



TUGAS AKHIR - TM 091585

SIMULASI PROSES PENGERINGAN KAYU DENGAN VARIASI KECEPATAN DAN PROSES PENGERINGAN TERHADAP PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA

**CHERIDOLANG MAYSES SITANGGANG
NRP 2113 106 045**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM 091585

***SIMULATION OF WOOD DRYING PROCESS WITH
VELOCITY AND DRYING PROCESS VARIATION TO
MASS AND HEAT TRANSFER***

**CHERIDOLANG MAYSES SITANGGANG
NRP 2113 106 045**

**Advisor
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

**SIMULASI PROSES PENGERINGAN KAYU DENGAN
VARIASI KECEPATAN DAN PROSES PENGERINGAN
TERHADAP MASS AND HEAT TRANSFER
MENGUNAKAN SOFTWARE FLUENT**

TUGAS AKHIR

Drajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Cheridolang Mayses Sitangang

NRP. 2113 106 045

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng. (Pembimbing)
(NIP.196505051990031005)
2. Vivien Suphandani, ST., M.Eng., PhD. (Penguji I)
(NIP.198105292003122001)
3. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME. (Penguji II)
(NIP.195312191981031001)
4. Ary Bachtiar K.P., ST., MT., PhD. (Penguji III)
(NIP. 197105241997021001)

**SURABAYA
JULI, 2016**

SIMULASI PROSES PENGERINGAN KAYU DENGAN VARIASI KECEPATAN DAN PROSES PENGERINGAN TERHADAP PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA

Nama Mahasiswa : Cheridolang Mayses Sitanggang
NRP : 2113106045
Jurusan : Teknik Mesin, FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng.

ABSTRAK

Proses pengeringan kayu dari pohon menjadi kayu yang siap dipakai menjadi *furniture* mengalami proses yang cukup lama. Untuk itu diperlukan teknologi yang dapat membantu dalam mengeringkan kayu sampai layak dipakai sehingga proses pengeringan dapat berlangsung menjadi lebih cepat. Selain itu juga dibutuhkan teknologi yang dapat menjangkau seluruh kalangan terutama di pedalaman atau di tengah hutan dengan atau tanpa sumber listrik sekalipun. Penelitian terkait model pengeringan kayu khususnya model lama yang menggunakan *biomass* sebagai bahan bakarnya menjadi menarik untuk dilakukan sebagai upaya untuk membantu memecahkan masalah UKM di pedalaman yang tidak mendapatkan listrik.

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik (*CFD*) menggunakan *software Fluent*. Pemilihan kondisi simulasi digunakan skema interpolasi *second-order upwind*, model turbulensi *k-ε realizable* dan geometri sistem pengering kayu yang dimodelkan seperti model baru. Pemodelan perpindahan massa dilakukan dengan menggunakan model *species transport* dengan melakukan pengaturan *moisture content water* pada permukaan kayu serta fraksi massa air pada udara masuk. Pada penelitian ini divariasikan kecepatan *inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s, serta variasi proses pengeringan *one through* dan *circulated*. Penelitian

disimulasikan pada kondisi *steady* dengan *time step* 3 jam pada $v = 2.507 \text{ m/s}$ dan 4 jam pada $v = 1.4 \text{ m/s}$.

Dari penelitian ini diketahui variasi proses pengeringan tidak terlalu banyak mempengaruhi karakteristik pengeringan. Laju pengeringan yang memiliki waktu paling cepat adalah pada proses pengeringan *circulated* dengan *velocity inlet* 2.507 m/s yaitu 33 jam dengan *moisture content* 8.23%, lalu proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* 2.507 m/s yaitu 33 jam dengan *moisture content* 10.09%, kemudian proses pengeringan *circulated* pada *velocity inlet* 1.4 m/s yaitu 52 jam dengan *moisture content* 3.17% dan terakhir proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* 1.4 m/s yaitu 52 jam dengan *moisture content* 6.23%. *Moisture content* kayu dapat berkurang dari 70% hingga kurang dari 15%.

Kata kunci : Pengering Kayu, Drying Chamber, Fluent, CFD, Laju Pengeringan, Moisture Content, Humidifikasi.

SIMULATION OF WOOD DRYING PROCESS WITH VELOCITY AND DRYING PROCESS VARIATION TO MASS AND HEAT TRANSFER

Student Name : Cheridolang Mayses Sitanggang
NRP : 2113106045
Department : Teknik Mesin, FTI-ITS
Advisor : Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng.

ABSTRACT

Wood drying process from a tree become a wood that ready to use to a furniture have a long process. Therefore a technology that can help in a wood drying process until the woods are ready to use in a short time is needed. Other than that, a technology that can reach every people even in a middle of a forest with or without electricity is needed too. Research of wood drying model especially old model which use biomass as a fuel is very interesting to do as an attempt to help every people inland who didn't have an electricity.

In this research, a computational fluid dynamics (CFD) with Fluent software are used. This simulation used a second-order upwind as an interpolation scheme, $k-\epsilon$ realizable as a turbulence model and the geometry of this wood drying process are made like a new model. In this simulation a species transport model are used as a mass transfer process with a moisture content settings on a wood surface and mass fraction settings on the air inlet. This simulation using a variation of velocity inlet 2.507 m/s and 1.4 m/s, and then a variation of drying process one through and circulated. This research was simulated on a steady condition with 3 hours time step for 2.507 m/s velocity inlet and 4 hours time step for 1.4 m/s velocity inlet.

From this research known that a variation of drying process didn't very affected to a drying characteristic. The fastest variation of drying process are known circulated drying process

with velocity inlet 2.507 m/s need 33 hours to make wood moisture content into 8.23%, then one through drying process with velocity inlet 2.507 m/s need 33 hours to make wood moisture content into 10.09%, and then circulated drying process with velocity inlet 1.4 m/s need 52 hours to make wood moisture content into 3.17%, last one through drying process with velocity inlet 1.4 m/s need 52 hours to make wood moisture content into 6.23%. Wood moisture content can reduce from 70% until less than 15%.

Keywords : Wood Drying, Drying Chamber, Fluent, CFD, Drying Rate, Moisture Content, Humidification.

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Laporan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.1.1 Muh. Muhakkikin Faizy (2013).....	7
2.1.2 V. Zadin (2015).....	11
2.2 Dasar Teori.....	15
2.2.1 Proses Pengeringan.....	15
2.2.2 Prinsip Thermodinamika.....	19
2.2.3 Prinsip Psychometric.....	21
2.2.4 Prinsip Perpindahan Massa.....	23
2.2.5 Analogi Perpindahan Panas dengan Perpindahan Massa.....	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Tahapan Penelitian	27
3.2 Permodelan dan Simulasi	28
3.2.1 <i>Pre-Processing</i>	29
3.2.2 <i>Processing</i>	32
3.2.3 <i>Post Processing</i>	40
3.3 <i>Flowchart</i> Penelitian	41
3.3.1 <i>One Through</i>	41

3.3.2 <i>Circulated</i>	43
BAB IV ANALISA DATA DAN DISKUS.....	45
4.1 Contoh Perhitungan.....	45
4.1.1 Menghitung Massa Udara yang Masuk ke <i>Drying Chamber</i>	45
4.1.2 Menghitung Massa Kayu.....	46
4.1.3 Perhitungan Setelah Simulasi.....	46
4.1.4 <i>Heat and mass balance</i>	47
4.1.5 Menghitung panas yang dibutuhkan pengering.....	48
4.1.6 Boundary Condition untuk Simulasi Selanjutnya.....	48
4.2 Analisa Kualitatif Karakteristik Pengeringan.....	48
4.2.1 Analisa Kontur Temperatur terhadap Variasi <i>Velocity Inlet</i>	49
4.2.1.1 Kontur Temperatur pada <i>Velocity Inlet</i> 2.504 m/s.....	49
4.2.1.2 Kontur Temperatur pada <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s.....	50
4.2.2 Analisa Kontur Fraksi Massa H_2O Terhadap Variasi <i>Velocity Inlet</i>	51
4.2.2.1 Kontur Fraksi Massa H_2O pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s.....	52
4.2.2.2 Kontur Fraksi Massa H_2O pada <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s.....	53
4.3 Analisa Kuantitatif Karakteristik Pengeringan.....	54
4.3.1 Analisa Perubahan <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i>	55
4.3.1.1 Grafik <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s dengan Proses Pengeringan <i>One Through</i>	55
4.3.1.2 Grafik <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i>	

pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s dengan Proses Pengeringan <i>Circulated</i>	56
4.3.1.3 Grafik <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s dengan Proses Pengeringan <i>One Through</i>	57
4.3.1.4 Grafik <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s dengan Proses Pengeringan <i>Circulated</i>	58
4.3.1.5 Grafik Perbandingan <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s dan 1.4 m/s.....	59
4.3.1.6 Grafik Perbandingan <i>Moisture Content</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i> pada proses pengeringan <i>one through</i> dan <i>circulated</i> dengan <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s.....	60
4.3.2 Analisa Perubahan <i>Drying Rate</i> terhadap <i>Time Step</i>	61
4.3.2.1 Grafik <i>Drying Rate</i> terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s dengan Proses Pengeringan <i>One Through</i>	61
4.3.2.2 Grafik <i>Drying Rate</i> terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s dengan Proses Pengeringan <i>Circulated</i>	62
4.3.2.3 Grafik <i>Drying Rate</i> terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i>	

1.4 m/s dengan Proses Pengeringan <i>One Through</i>	63
4.3.2.4 Grafik <i>Drying Rate</i> terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s dengan Proses Pengeringan <i>Circulated</i>	64
4.3.2.5 Grafik Perbandingan <i>Drying</i> <i>Rate</i> Kayu terhadap <i>Time Step</i> pada <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s dan 1.4 m/s.....	65
4.3.2.6 Grafik Perbandingan <i>Moisture</i> <i>Content</i> Kayu terhadap Time Step pada proses pengeringan <i>one through</i> dan <i>circulated</i> dengan <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s.....	66
4.4 Analisa <i>Psychrometric</i> Karakteristik Pengeringan...	67
4.4.1 Analisa <i>Psychrometric Chart</i> dengan <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s pada Proses Pengeringan <i>One Through</i>	67
4.4.2 Analisa <i>Psychrometric Chart</i> dengan <i>Velocity Inlet</i> 2.507 m/s pada Proses Pengeringan <i>Circulated</i>	69
4.4.3 Analisa <i>Psychrometric Chart</i> dengan <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s pada Proses Pengeringan <i>One Through</i>	70
4.4.4 Analisa <i>Psychrometric Chart</i> dengan <i>Velocity Inlet</i> 1.4 m/s pada Proses Pengeringan <i>Circulated</i>	71
BAB V PENUTUP.....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Lokasi DISPERINDAG Jatim Pasuruan.....	1
Gambar 1.2	Pengering kayu model lama.....	2
Gambar 1.3	Pengering kayu model baru.....	3
Gambar 2.1	Skema geometri tiga tipe susunan batubara.....	8
Gambar 2.2	Kontur temperatur setiap susunan.....	8
Gambar 2.3	Kontur fraksi massa H_2O setiap susunan.....	9
Gambar 2.4	Perubahan <i>moisture content coal</i> terhadap waktu.....	9
Gambar 2.5	Properties temperatur dan <i>relative humidity</i> setiap <i>iso-surface</i> (a) 316 K (b) 327 K (c) 339 K.....	10
Gambar 2.6	<i>Psychrometric chart</i>	10
Gambar 2.7	(a) <i>Full 3D simulations geometry</i> (b) <i>2D calculations geometry</i> (c) Kayu yang akan dikeringkan.....	11
Gambar 2.8	Distribusi kecepatan pada <i>cross section</i> di dalam <i>kiln</i> dengan kecepatan ventilasi (a) 5 m/s (b) 8 m/s.....	12
Gambar 2.9	Distribusi temperatur (a) <i>Full 3D</i> simulasi (b) pada <i>surface kiln</i> dengan waktu 168 jam sesudah pengoperasian (c) dengan waktu 24 jam setelah pengoperasian.....	13
Gambar 2.10	Distribusi temperatur dan RH pada <i>kiln</i> setelah 24 jam dioperasikan pada kecepatan ventilasi 5 m/s (a, c) dan 8 m/s (b, d).....	13
Gambar 2.11	<i>Wood moisture content</i> pada waktu 120 jam setelah pengoperasian dengan kecepatan ventilasi (a) 5 m/s (b) 8 m/s.....	14
Gambar 2.12	Grafik pengaruh waktu terhadap <i>wood moisture content</i> dengan variasi pengeringan dan kecepatan ventilasi.....	15
Gambar 2.13	Proses Pengeringan pada <i>Psychrometric</i>	

	<i>Chart</i>	17
Gambar 2.14	Kurva Periode Proses Pengeringan (a) <i>Humidity ratio rate</i> (b) <i>Drying rate</i>	18
Gambar 2.15	Hubungan antara <i>saturated vapor pressure</i> dan temperatur.....	20
Gambar 2.16	Prinsip Pengeringan pada <i>Psychometric</i> <i>Chart</i>	21
Gambar 2.17	Skema Perpindahan Massa secara Konveksi.....	24
Gambar 3.1	Skema sistem pengeringan kayu.....	28
Gambar 3.2	<i>Drying Chamber Geometry</i>	29
Gambar 3.3	Detail dinding bagian atas.....	30
Gambar 3.4	Dimensi dan jarak antar kayu.....	30
Gambar 3.5	Susunan kayu di Pasuruan.....	31
Gambar 3.6	<i>Drying chamber Meshing</i>	32
Gambar 3.7	Penentuan <i>viscous model</i> pada <i>Fluent</i>	33
Gambar 3.8	Penentuan <i>species transport</i> pada <i>Fluent</i>	34
Gambar 3.9	Penentuan <i>material</i> pada <i>Fluent</i>	35
Gambar 3.10	Penentuan <i>Boundary Condition</i>	36
Gambar 3.11	Penentuan <i>inlet</i> fraksi massa.....	37
Gambar 3.12	Penentuan <i>Solution Controls</i>	38
Gambar 3.13	Penentuan <i>Residual</i>	39
Gambar 3.14	<i>Relative humidity</i> lebih dari 100%.....	40
Gambar 3.15	<i>Flowchart</i> sistem pengeringan secara <i>one</i> <i>through</i>	41
Gambar 3.16	<i>Flowchart</i> sistem pengeringan secara <i>circulated</i>	43
Gambar 4.1	<i>Heat and mass balance</i>	47
Gambar 4.2	Kontur temperatur pada variasi <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s.....	49
Gambar 4.3	Kontur temperatur pada variasi <i>velocity inlet</i> 1.4 m/s.....	50
Gambar 4.4	Kontur fraksi massa H_2O pada variasi <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s.....	52
Gambar 4.5	Kontur fraksi massa H_2O pada variasi <i>velocity inlet</i> 1.4 m/s.....	53

Gambar 4.6	Perubahan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s dengan proses pengeringan <i>one through</i>	55
Gambar 4.7	Perubahan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s dengan proses pengeringan <i>circulated</i>	56
Gambar 4.8	Perubahan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 1.4 m/s dengan proses pengeringan <i>one through</i>	57
Gambar 4.9	Perubahan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 1.4 m/s dengan proses pengeringan <i>circulated</i>	58
Gambar 4.10	Perbandingan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s dan 1.4 m/s.....	59
Gambar 4.11	Perbandingan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada proses pengeringan <i>one through</i> dan <i>circulated</i>	60
Gambar 4.12	Perubahan <i>drying rate</i> terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s dengan proses pengeringan <i>one through</i>	61
Gambar 4.13	Perubahan <i>drying rate</i> terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s dengan proses pengeringan <i>circulated</i>	62
Gambar 4.14	Perubahan <i>drying rate</i> terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 1.4 m/s dengan proses pengeringan <i>one through</i>	63
Gambar 4.15	Perubahan <i>drying rate</i> terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 1.4 m/s dengan proses pengeringan <i>circulated</i>	64
Gambar 4.16	Perbandingan <i>moisture content</i> kayu terhadap waktu pada <i>velocity inlet</i> 2.507 m/s dan 1.4 m/s.....	65
Gambar 4.17	Perbandingan <i>drying rate</i> kayu terhadap waktu pada proses pengeringan <i>one through</i>	

	dan <i>circulated</i>	66
Gambar 4.18	<i>Psychrometric Chart velocity inlet 2.507 m/s</i> pada proses pengeringan <i>one through</i>	67
Gambar 4.19	<i>Psychrometric Chart velocity inlet 2.507 m/s</i> pada proses pengeringan <i>Circulated</i>	69
Gambar 4.20	<i>Psychrometric Chart velocity inlet 1.4 m/s</i> pada proses pengeringan <i>one through</i>	70
Gambar 4.21	<i>Psychrometric Chart velocity inlet 1.4 m/s</i> pada proses pengeringan <i>Circulated</i>	71

DAFTAR TABEL

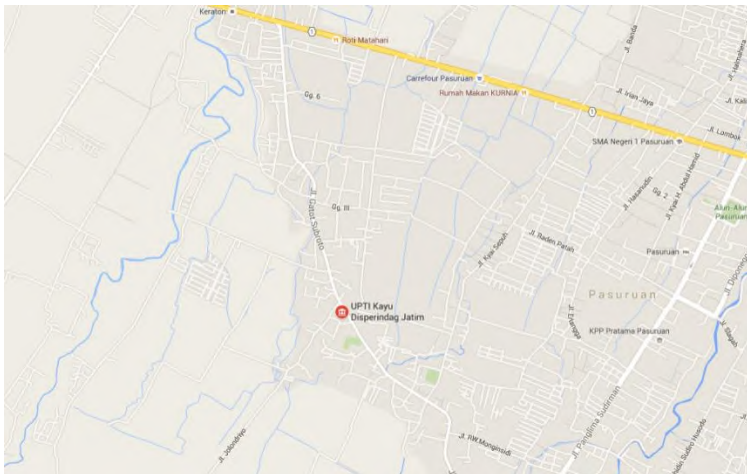
Tabel 3.1	Detail susunan kayu.....	31
Tabel 3.2	Detail penentuan <i>Fluent</i>	39

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara yang dikenal dengan sumber daya alamnya, contohnya seperti hutannya yang dikenal juga sebagai paru-paru dunia. Karena hutannya yang lebat maka tidak sedikit juga penduduk Indonesia yang memanfaatkan sumber daya alam ini dengan baik. *Furniture* adalah salah satu usaha yang dikembangkan menggunakan sumber daya alam ini, mengingat bahwa kualitas kayu Indonesia merupakan salah satu yang terbaik di dunia. Usaha *furniture* sendiri di Indonesia dikembangkan oleh banyak perusahaan swasta serta negara, salah satunya yaitu oleh Dinas Perindustrian dan Perdagangan (DISPERINDAG). DISPERINDAG sendiri membuat pusat furniture di banyak tempat untuk melayani masyarakat yang ingin melakukan usaha *furniture*. Salah satu pusat furniture yang dibuat DISPERINDAG terdapat di Pasuruan.



Gambar 1.1 Lokasi DISPERINDAG Jatim Pasuruan

DISPERINDAG Jatim Pasuruan terletak di Jl. Gatot Subroto Pasuruan atau lebih dikenal di sentra *furniture* Pasuruan, lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di atas. Untuk mencapai lokasi dibutuhkan waktu kira-kira 1,5 jam dari Surabaya dengan menggunakan tol, atau 2 jam jika tidak menggunakan tol. Pada sentra *furniture* Pasuruan ini terdapat pengering kayu (*wood dryer*) yang digunakan untuk mengeringkan kayu sebelum diolah. Kayu yang berasal dari pohon mempunyai kandungan air sekitar 70% yang akan membuat hasil menjadi kurang baik jika langsung diproses. Maka dari itu digunakan pengering kayu untuk mengeringkan kayu dari kandungan air sekitar 70% menjadi sekitar 10 sampai 15% agar hasilnya dapat menjadi baik nanti setelah diproses. Untuk mengurangi kandungan air pada kayu dari 70% sampai dengan 10 sampai 15 % dibutuhkan waktu kurang lebih 12 hari di dalam pengering kayu.

Terdapat dua jenis pengering kayu yaitu, model lama (*conventional*) dan model baru. Adapun model lama menggunakan kayu-kayu sisa yang dibakar di ruang bakar untuk memanaskan plat kemudian menggunakan *blower* untuk mengalirkan panas ke *stack* masuk ke dalam ruang pengeringan. Proses tersebut sangat sederhana dan dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 1.2 Pengering kayu model lama

Untuk pengering kayu model baru terlihat lebih *modern* karena menggunakan teknologi *heater* sebagai pemanasnya. *Heater* yang diletakkan di depan *blower* berada di dalam ruang pengeringan, sehingga udara panas yang dialirkan langsung di dalam ruang pengering dan terus disirkulasikan. Situasi ini membuat udara di dalam ruang pengering menjadi semakin memanas. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 1.3 Pengering kayu model baru

Dari kedua jenis pengering yang ada, penulis melihat bahwa ada kekurangan pada pengering model lama. Maka dari itu penulis melakukan penelitian untuk membantu UKM agar dapat meningkatkan serta memajukan usahanya.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini dapat

dirumuskan secara perhitungan thermodinamika dan perpindahan panas serta simulasi. Simulasi dilakukan menggunakan *software Fluent* agar didapat *temperature* pada outlet ruang bakar. Dari hasil *Fluent* yang di dapat data dimasukan pada *psychrometric chart* lalu dihitung menggunakan perhitungan thermodinamika dan perpindahan panas.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam studi ini adalah :

1. Pengambilan data dilakukan di UPTI Kayu DISPERINDAG, Pasuruan.
2. Simulasi dilakukan hanya pada *drying chamber*.
3. Pemodelan ruang pengering hanya dalam bentuk dua dimensi.
4. Kondisi simulasi di asumsikan *steady state*.
5. Proses pengeringan hanya terjadi pada permukaan kayu.
6. Mengabaikan proses perpindahan massa secara difusi pada kayu.
7. Dinding ruang pengering terinsulasi dengan sempurna.
8. Untuk modeling menggunakan *software Gambit*.
9. Simulasi menggunakan *software Fluent*.
10. Proses pengeringan diasumsikan *isenthalpy* pada *psychrometric chart*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui desain operasi ruang pengering yang baik agar dapat mengeringkan seluruh kayu di dalam ruang pengering dengan cepat.
2. Mengetahui fenomena *mass transfer* yang terjadi di dalam ruang pengering.

3. Mengetahui perubahan *humidity* yang terjadi di dalam ruang pengering.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Mempelajari lebih dalam tentang *mass transfer* dan *humidity* dalam kasus nyata.
2. Mempelajari penggunaan simulasi CFD menggunakan *software Fluent*.
3. Membantu UKM agar dapat memajukan dan meningkatkan usahanya.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut :

- **BAB I PENDAHULUAN**, Bab ini berisi tentang latar belakang dari penelitian ini, perumusan masalah, batasan masalah dan tujuan penelitian dari penelitian, manfaat dari penelitian yang dilakukan, dan sistematika laporan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**, Bab ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu dasar teori dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam penganalisaan hasil penelitian. Sedangkan penelitian terkait yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada korelasinya dengan penelitian kali ini, yang juga menjadi penunjang dalam analisa data.
- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**, Bab ini menerangkan tentang langkah-langkah pemodelan dengan menggunakan *software Gambit* dan langkah-

langkah simulasi dengan menggunakan *software Fluent*.

- **BAB IV ANALISA DAN DISKUSI**, Bab ini berisi tentang hasil-hasil numerik (*post processing*) kualitatif dan kuantitatif dari *software Fluent* berupa kontur, contoh perhitungan, grafik yang sudah dihitung kemudian dianalisa dan didiskusikan lebih lanjut.
- **BAB V PENUTUP**, Bab penutup ini terdiri dari dua sub bab, yaitu kesimpulan dari hasil numerik (*post processing*) dan saran yang perlu diberikan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

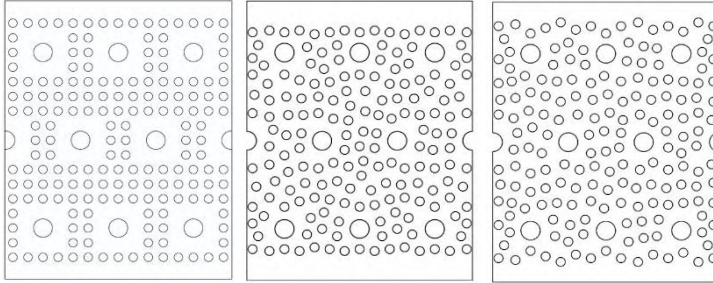
2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.1 Muh. Muhakkikin Faizy (2013)

Penelitian berbasis analisa numerik di dalam suatu peralatan pengeringan pernah dilakukan oleh **Muh. Muhakkikin Faizy (2013)**. Dalam tugas akhirnya yang berjudul “*Studi Numerik Karakteristik Laju Pengeringan Batubara Terhadap Pengaruh Variasi Temperatur Udara Pengering Pada Fluidized Bed Coal Dryer Dengan Tube Heater Tersusun Staggered Dan Perbandingan Volume Batubara Dengan Volume Chamber Sebesar 80%*” telah dilakukan kajian pada alat pengering batubara dengan melakukan variasi temperatur udara pengering, volume dan susunan batubara. Dalam penelitiannya **Muh. Muhakkikin Faizy (2013)** melakukan pemodelan batubara sebagai objek pengeringan.

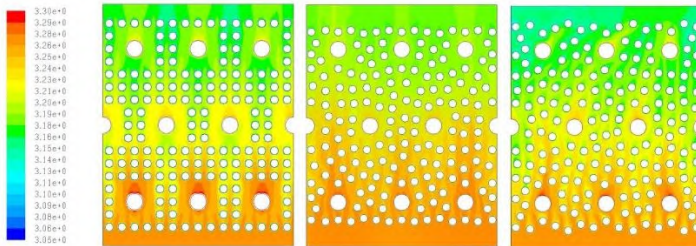
Dalam penelitian tersebut digunakan bantuan *software Fluent* untuk simulasi dan *Gambit* sebagai *software* untuk membangun geometri simulasi. Dalam simulasi digunakan permodelan aliran turbulen (Realizable K- ϵ). Sementara untuk fluida pemanasnya digunakan fluida udara dan uap air dengan kecepatan 16.187 m/s. Variabel uji dalam penelitian ini adalah temperatur fluida pada sisi inlet. Variasi temperatur yang digunakan dalam penelitian ini adalah 316 K, 327 K dan 339 K serta susunan batubara secara tersusun dan secara acak.

Hasil yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh **Muh. Muhakkikin Faizy (2013)** adalah didapatkannya kondisi variasi temperature dengan laju pengeringan tercepat. Susunan batubara secara teratur dan acak tidak mempengaruhi karakteristik pengeringan. Laju pengeringan tercepat di peroleh pada temperatur 339 K. Temperatur udara pengering mempengaruhi karakteristik pengeringan batu bara, semakin tinggi temperatur udara pengering laju perpindahan massa *moisture content* batubara ke udara semakin cepat.



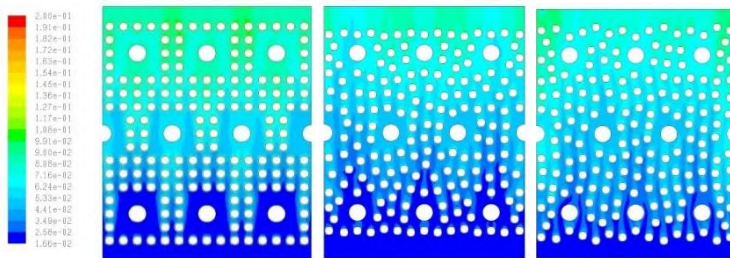
Gambar 2.1 Skema geometri tiga tipe susunan batubara

Variasi susunan batu bara yang digunakan yaitu tersusun dan acak dapat dilihat pada gambar di atas. Terdapat tiga susunan batubara untuk di simulasikan dimulai dari tersusun pada gambar kiri, lalu susunan acak pada gambar tengah dan kanan. Susunan batubara acak pada gambar bagian kanan terlihat lebih renggang dibandingkan gambar pada bagian tengah.



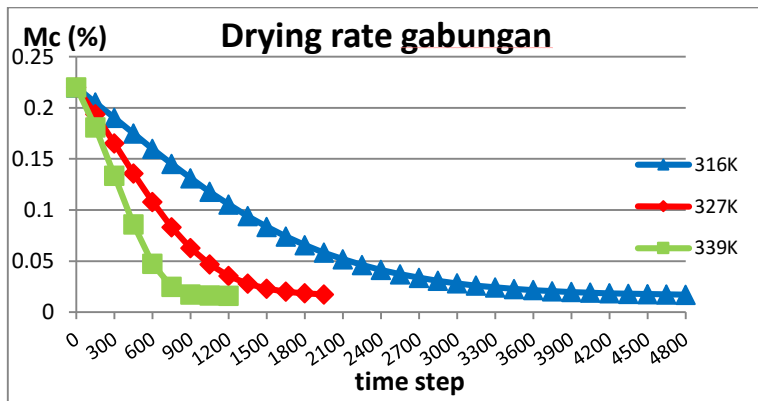
Gambar 2.2 Kontur temperatur setiap susunan

Gambar di atas merupakan kontur temperatur pada setiap susunan. Terlihat bahwa setiap susunan mempunyai kontur yang *relative* sama. Panas yang masuk pada *inlet* terlihat merata sampai dengan keluar pada *outlet*. Terjadi penurunan temperatur dari kontur berwarna jingga hingga menjadi berwarna hijau yang disebabkan karena proses pengeringan.



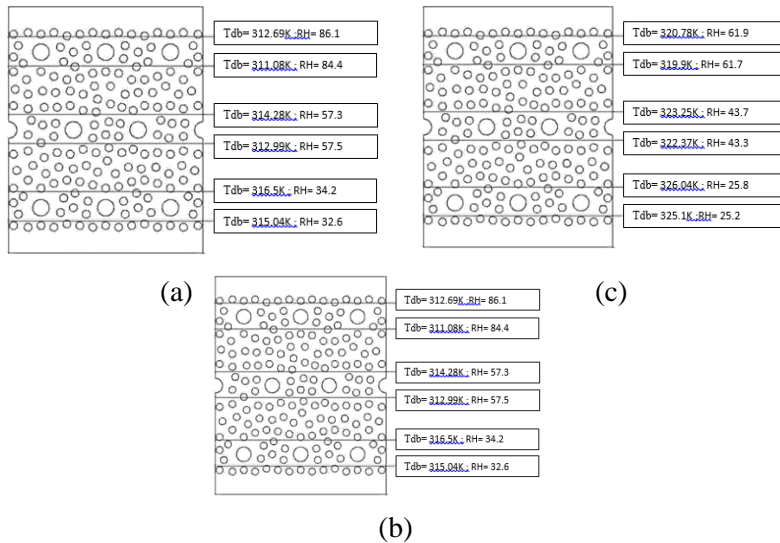
Gambar 2.3 Kontur fraksi massa H_2O setiap susunan

Gambar di atas merupakan kontur massa H_2O pada setiap susunan. Terlihat bahwa setiap susunan mempunyai kontur yang *relative* sama. Massa H_2O yang masuk pada *inlet* terlihat lebih sedikit dibandingkan massa H_2O pada *outlet*. Proses pengeringan membuat massa H_2O pada batubara terbawa udara sehingga massa H_2O pada *outlet* terlihat lebih banyak dibandingkan dengan *inlet*.



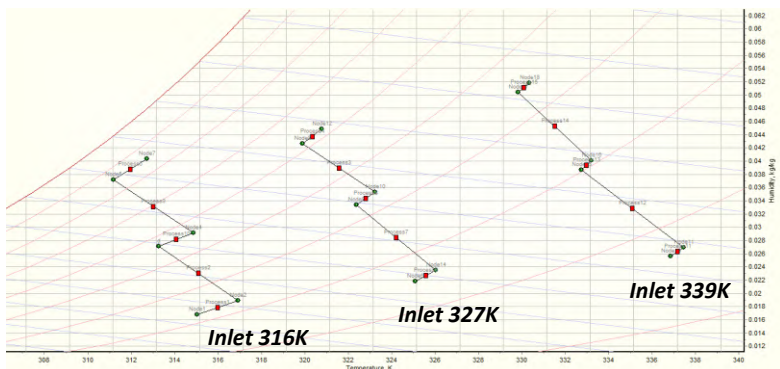
Gambar 2.4 Perubahan *moisture content* coal terhadap waktu

Pada grafik drying rate di atas dapat dilihat bahwa pada variasi temperatur 339 K memiliki trend line yang paling curam. Proses pengeringan paling cepat dihasilkan oleh udara pengering dengan temperatur 339 K selama selang waktu sekitar 900 detik atau 15 menit. Pada grafik drying rate temperatur udara pengering paling tinggi (339K) memiliki laju pengeringan paling cepat.



Gambar 2.5 Properties temperatur dan *relative humidity* setiap *iso-surface* (a) 316 K (b) 327 K (c) 339 K

Dari hasil pengeringan didapat data setiap *iso surface* pada *chamber* seperti pada gambar di atas. *Iso-surface* dibuat sebelum dan sesudah tube heater. Data properties disetiap *iso-surface* jika diplot pada psychrometric chart.

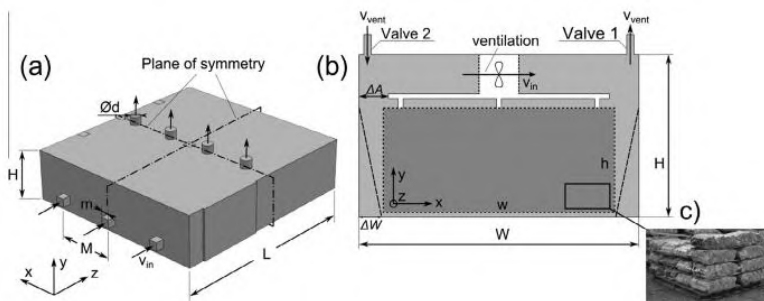


Gambar 2.6 Psychrometric chart

Pada gambar *pschrometric chart* diatas dapat dilihat terdapat 2 proses yaitu proses heating dan proses pendinginan (dan penyerapan kandungan air). Proses terjadi dimulai dari bawah menuju ke atas. Proses pertama merupakan proses heating dimana massa H_2O yang terbawa udara temperaturnya terpanaskan. Proses kedua merupakan proses pendinginan dan penyerapan kandungan air dimana massa H_2O yang terbawa udara mengalami pendinginan yang membuat *relative humidity* meningkat. Variasi temperatur 339 K mempunyai udara yang paling kering (*relative humidity* paling kecil) dan mempunyai perbedaan fraksi massa yang paling besar yang membuat proses dengan variasi temperatur 339 K merupakan yang paling cepat kering.

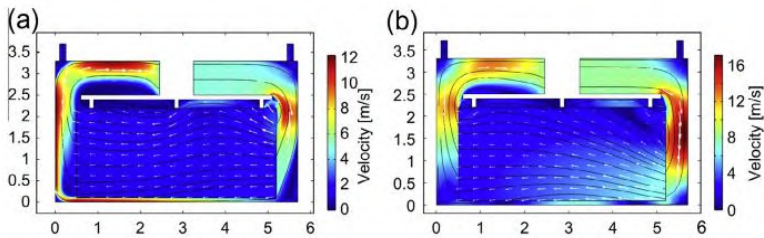
2.1.2 V. Zadin (2015)

Penelitian berbasis analisa numerik di dalam suatu peralatan pengeringan pernah dilakukan juga oleh **V. Zadin (2015)**. Dalam jurnalnya yang berjudul “*Application Of Multiphysics And Multiscale Simulations To Optimize Industrial Wood Drying Kilns*” telah dilakukan kajian pada alat pengering kayu dengan melakukan simulasi benda yang akan dikeringkan di dalam *kiln*. Dalam penelitiannya **V. Zadin (2015)** melakukan pemodelan kayu sebagai objek pengeringan dengan *costum geometry*.



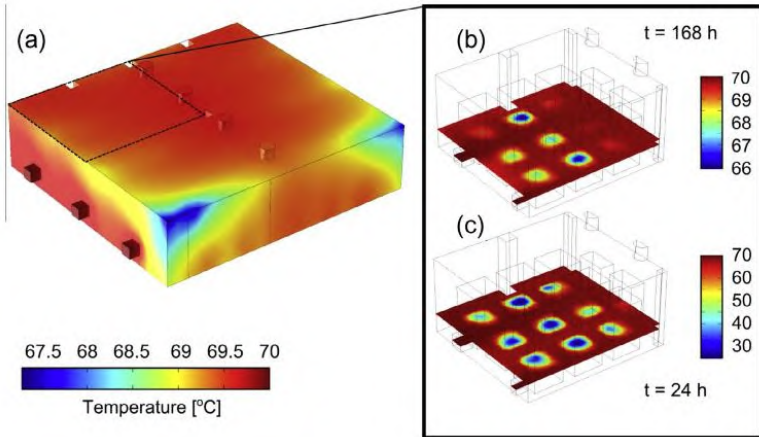
Gambar 2.7 (a) *Full 3D simulations geometry* (b) *2D calculations geometry* (c) Kayu yang akan dikeringkan

Dalam penelitian tersebut digunakan bantuan *Comsol Multiphysics* sebagai *software* untuk membangun geometri alat uji. Pada pengerjaannya digunakan poros media sebagai pengganti kayu untuk penyederhanaannya. Lalu dalam simulasi digunakan permodelan aliran turbulen (*Realizable K- ϵ*). Sementara untuk fluida pemanasnya digunakan fluida udara kering dengan temperatur $T_{inlet} = 70^{\circ}\text{C}$. Variabel uji dalam penelitian ini adalah kecepatan ventilasi dan variasi pengeringan. Variasi kecepatan ventilasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 5 m/s pada geometri 1 dan 1-8 m/s pada geometri 2, sementara variasi pengeringan yang digunakan adalah kondisi semua *moisture* telat keluar melalui *outlet* dan hanya udara kering yang masuk melalui *inlet* (*perfect drying*) dan kondisi ventilasi terbatas dengan ventilasi hanya digunakan untuk membuang *moisture* dan memasukkan udara kering (*vented drying*).

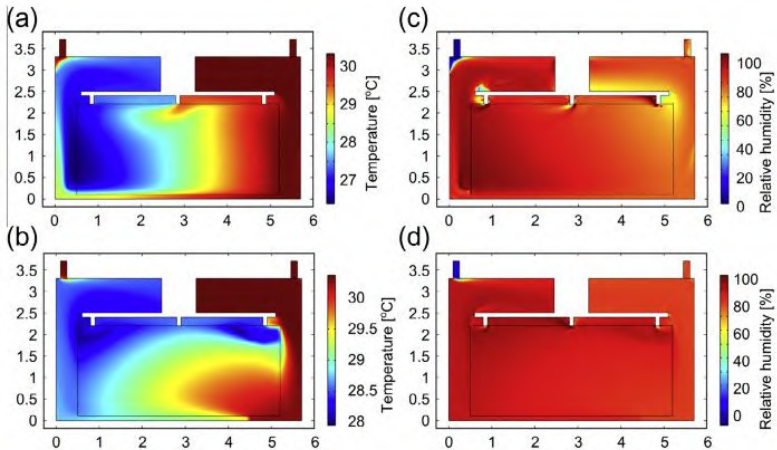


Gambar 2.8 Distribusi kecepatan pada *cross section* di dalam kiln dengan kecepatan ventilasi (a) 5 m/s (b) 8 m/s

Dari distribusi kecepatan yang dihasilkan dapat dilihat bahwa pada kecepatan ventilasi 5 m/s aliran yang mengalir di *drying chamber* lebih merata dibandingkan kecepatan ventilasi pada 8 m/s. Hal ini disebabkan karena *pressure drop* yang terjadi pada kecepatan ventilasi 8 m/s lebih besar dibandingkan pada kecepatan ventilasi 5 m/s. Karena *pressure drop* yang kecil dan laju aliran lebih merata, maka kecepatan ventilasi 5 m/s merupakan kecepatan yang paling baik untuk melakukan penelitian tersebut.

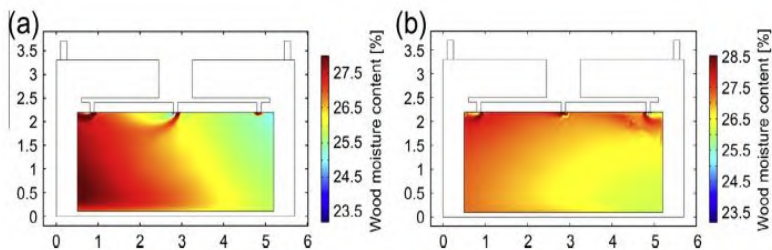


Gambar 2.9 Distribusi temperatur (a) *Full 3D* simulasi (b) pada surface *kiln* dengan waktu 168 jam sesudah pengoperasian (c) dengan waktu 24 jam setelah pengoperasian

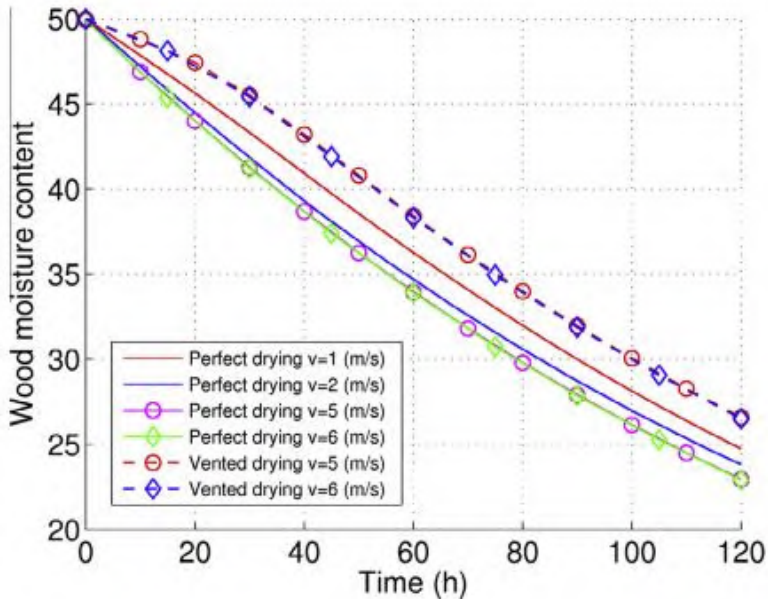


Gambar 2.10 Distribusi temperatur dan RH pada *kiln* setelah 24 jam dioperasikan pada kecepatan ventilasi 5 m/s (a, c) dan 8 m/s (b, d)

Pada gambar 2.9 dapat dilihat hasil simulasi dengan distribusi temperature pada geometri 3D. Pada geometri 2D di lakukan simulasi pada *surface kiln*. Dapat dilihat bahwa pada waktu 168 jam setelah pengoperasian lebih merata dibandingkan pada waktu 24 jam setelah pengoperasian. Lalu pada gambar 2.10 dapat dilihat hasil simulasi dengan distribusi temperature dan *RH* pada *kiln* saat 24 jam setelah pengoperasian dengan kecepatan ventilasi 5 m/s dan 8 m/s.



Gambar 2.11 *Wood moisture content* pada waktu 120 jam setelah pengoperasian dengan kecepatan ventilasi (a) 5 m/s (b) 8 m/s



Gambar 2.12 Grafik pengaruh waktu terhadap *wood moisture content* dengan variasi pengeringan dan kecepatan ventilasi

Hasil yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh **V. Zadin (2015)** adalah didapatkannya kondisi variasi kecepatan yang paling optimal untuk pengeringan. Tercatat bahwa *perfect drying* dengan variasi kecepatan 5-6 m/s merupakan yang paling optimal. Hal ini disebabkan karena pada *perfect drying* dengan geometri 2D didapat *uniform flow profile* di dalam drying chamber yang membuat pengeringan menjadi lebih merata.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Proses Pengeringan

Konsep dasar proses pengeringan adalah pengurangan kandungan air pada produk lewat proses tertentu hingga dicapai kondisi kandungan air pada produk yang diinginkan. Proses

pengeringan pada umumnya bertujuan untuk mengurangi kandungan air dalam sebuah produk. Kandungan air yang tidak berlebih akan mempengaruhi kualitas dari sebuah produk. Pengeringan yang dilakukan pada bahan pangan umumnya bertujuan untuk pengawetan dan mencegah pembusukan akibat kandungan air yang berlebihan. Sementara itu pengeringan yang dilakukan pada kayu bertujuan untuk mendapatkan kekeringan kayu yang ideal agar dapat diproses dengan baik nantinya.

Proses pengeringan pada sebuah produk terjadi dalam beberapa tahap. Proses pertama adalah pergerakan air dari dalam menuju lapisan luar produk yang diakibatkan oleh adanya perbedaan suhu akibat pemanasan yang terjadi selama proses pengeringan. Proses berikutnya adalah penguapan kandungan air pada permukaan produk. Kandungan air yang menguap dari permukaan produk akan tercampur oleh udara pemanas hingga menyebabkan naiknya kandungan air pada udara.

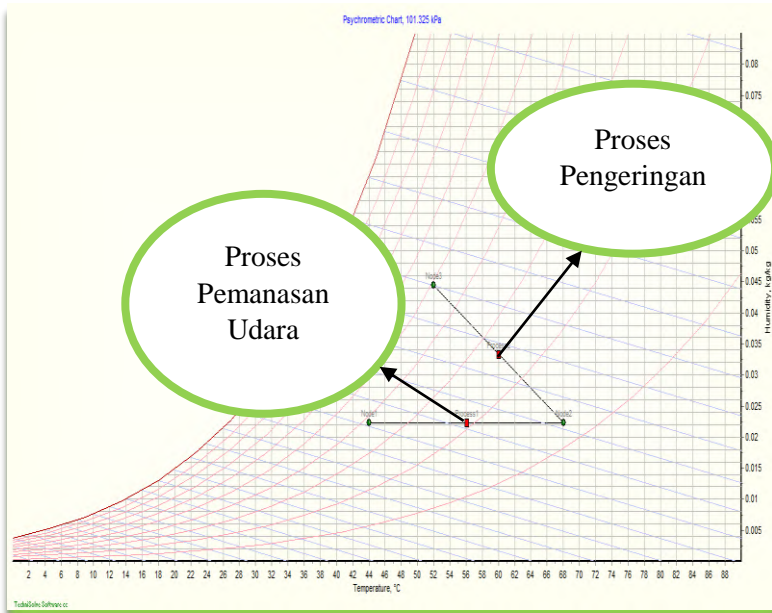
Proses pengeringan digunakan secara luas dalam berbagai lingkup industri. Berdasarkan prosesnya, pengeringan dapat dikelompokkan menjadi beberapa proses antara lain :

- **Pengeringan Alami :**

Proses pengeringan dengan pemanfaatan energi panas matahari. Pada pengeringan alami waktu pengeringan tidak dapat diperkirakan akibat ketidakstabilan proses.

- **Pengeringan Buatan**

Proses pengeringan buatan memiliki keunggulan dalam prosesnya. Pada proses pengeringan buatan, parameter proses dapat dikendalikan sehingga kualitas produk lebih baik dibandingkan pengeringan alami.

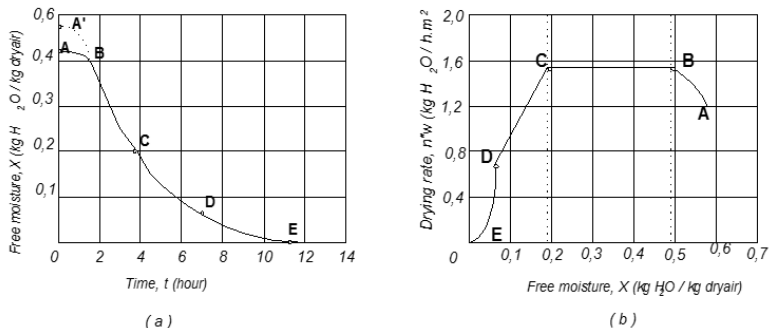


Gambar 2.13 Proses Pengeringan pada *Psychrometric Chart*

Proses pengeringan dapat digambarkan lewat *psychrometric chart* untuk memudahkan penganalisaan. Pada *psychrometric chart* dapat dilihat kondisi udara selama proses pengeringan terjadi. Pengeringan diawali dengan naiknya temperatur dari udara akibat udara pemanas yang disuplai dalam ruang pengeringan. Proses naiknya temperatur udara dapat dilihat dengan bergesernya titik awal udara ke arah kanan yang ditandai dengan naiknya temperatur *dry bulb* udara. Proses selanjutnya adalah perpindahan massa dengan diuapkannya kandungan air (*water*) dalam produk pengering. Proses penguapan ditandai dengan naiknya titik kondisi udara pemanas pada *psychrometric chart* ke arah kiri atas. Hal ini sebagai akibat dari naiknya kandungan air dalam udara setelah terjadi proses penguapan air (*water*) dari produk ke udara.

Pada proses pengeringan dapat dibagi menjadi beberapa periode proses. Periode pengeringan digolongkan berdasarkan gejala fisik proses pengeringan yang berbeda tiap waktu. Suatu proses pengeringan terdiri dari tiga periode laju pengeringan, yaitu :

- a. Periode laju pengeringan naik
- b. Periode laju pengeringan konstan
- c. Periode laju pengeringan menurun



Keterangan :

A - B : periode pemanasan

B - C : periode laju pengeringan konstan

C - D : periode laju pengeringan menurun pertama

C : kadar air kritis

D - E : periode laju pengeringan menurun kedua

Gambar 2.14 Kurva Periode Proses Pengeringan
(a) Humidity ratio rate (b) Drying rate

a. Periode Laju Pengeringan Naik

Sesaat setelah bahan menerima panas dari udara pengering yang panas, maka temperatur benda yang dikeringkan akan naik hingga mencapai kesetimbangan dengan temperatur *wet bulb* udara (T_{wb}).

b. Periode Laju Pengeringan Konstan

Pada periode ini (B - C) permukaan bahan jenuh dengan uap air, temperatur uap air pada permukaan sama dengan T_{wb} udara pengering. Selama proses ini berlangsung kecepatan aliran air dari

dalam bahan sama dengan kecepatan air yang diuapkan. Proses ini berakhir bila kadar air bebas bahan mencapai titik kritis (*critical moisture content*). Kadar air kritis adalah kadar air bebas terendah saat laju kecepatan air bebas ke permukaan sama dengan laju penguapan. Pada periode ini proses pengeringan bergantung pada faktor eksternal seperti laju aliran udara dan temperatur udara pengering.

c. Periode Laju Pengeringan Menurun

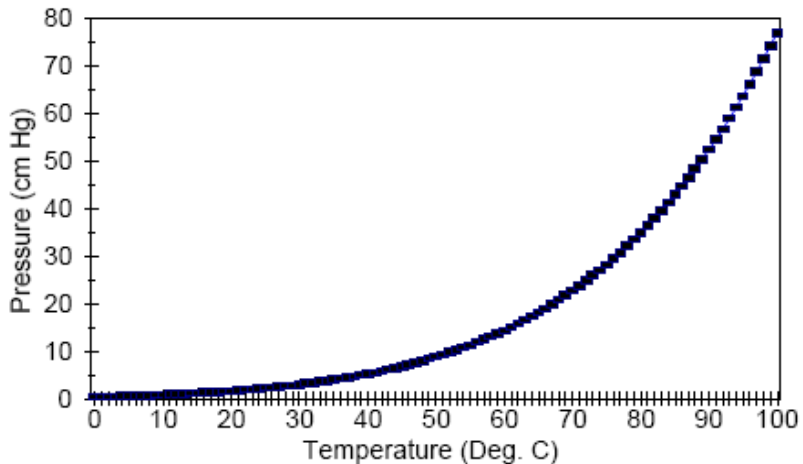
Titik C pada gambar adalah kadar air bebas kritis. Pada titik ini air pada permukaan tidak mencukupi untuk mempertahankan lapisan air yang kontinyu. Seluruh permukaan produk akan terus mengering sampai seluruh permukaan produk kering pada titik D. Pada fase kedua laju pengeringan menurun yang dimulai pada titik D saat seluruh permukaan produk telah kering, panas yang tersedia digunakan untuk menguapkan air pada produk dan selanjutnya karena perbedaan konsentrasi antara dalam dan permukaan maka air tersebut akan bergerak ke permukaan. Jumlah cairan yang diuapkan pada periode ini relatif kecil dan waktu yang diperlukan relatif lama.

2.2.2 Prinsip Thermodinamika

Pada prinsip thermodinamika diketahui bahwa titik didih air dipengaruhi oleh tekanan. Nilai titik didih air akan turun dengan turunnya tekanan. Hubungan antara tekanan jenuh uap air (*saturation vapor pressure*) dan temperatur dari 0 sampai 100°C dituliskan sebagai (Siau, 1984)

$$Po = 8,75 \times 10^7 \exp\left(-\frac{10400}{RT}\right) \quad (2.1)$$

Persamaan tersebut diplotkan pada gambar 2.3



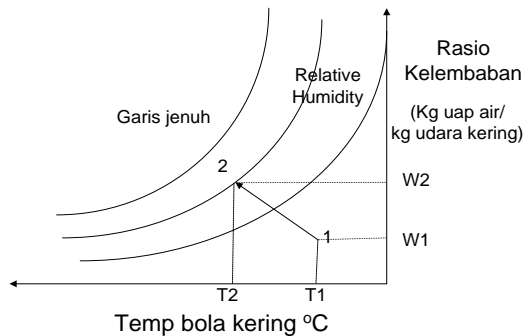
Gambar 2.15 Hubungan antara *saturated vapor pressure* dan temperatur

Pada proses pengeringan terjadi penguapan air ke udara karena perbedaan kandungan uap air antara udara dengan bahan yang dikeringkan. Tujuan umum dari pengeringan adalah mengurangi kadar air bahan sampai batas dimana perkembangan mikroorganisme dan kegiatan enzim yang dapat menyebabkan pembusukan dapat dihambat atau dihentikan. Proses yang dilakukan adalah dengan cara menaikkan tekanan parsial uap air pada bahan melalui pemberian panas dan menaikkan kelembaban relatif udara pengering.

Kemampuan udara membawa uap air bertambah besar apabila perbedaan tekanan parsial uap air pada udara pengering dengan pada bahan yang akan dikeringkan semakin besar. Pengeringan merupakan proses yang kompleks dari perpindahan panas dan perpindahan massa yang tergantung pada parameter eksternal seperti: temperatur, kelembaban udara, kecepatan aliran udara serta sifat bahan yang dikeringkan, seperti karakteristik permukaan bahan, komposisi kimia (lemak, gula, zat tepung, dan lain-lain), struktur fisik (porositas dan densitas), ukuran serta bentuk bahan.

2.2.3 Prinsip Psychrometric

Psikrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dengan uap air yang mempunyai arti penting dalam proses pengeringan, karena udara pada atmosfer tidak kering tetapi mengandung sejumlah uap. Pada gambar dibawah ini ditunjukkan Diagram Psikrometri yang menunjukkan proses pengeringan pada T_{wb} konstan.



Gambar 2.16 Prinsip Pengeringan pada *Psychrometric Chart*

Titik 1 – 2 menunjukkan udara ketika memasuki ruangan pengeringan dan berinteraksi dengan lapisan produk. Di antara titik 1 dan 2, udara menyerap air dari produk pada temperatur *wet bulb* (T_{wb}) konstan, sehingga terjadi penurunan temperatur bola kering dan terjadi kenaikan rasio kelembaban, kelembaban relatif, tekanan parsial uap air dan suhu titik embun.

Beberapa istilah-istilah yang sering digunakan dalam proses pengeringan antara lain

- a. *Moisture content* basis basah didefinisikan sebagai massa air dalam produk dibagi massa produk basah.

$$MC(\%)_{w.b.} = \frac{(m_p(t) - m_{p,kering})}{m_{p,basah}} \times 100\% = \frac{m_w(t)}{m_{p,basah}} \times 100\% \quad (2.2)$$

di mana

- $MC_{w.b}$ = kadar air suatu bahan basis basah (%).
- $m_w(t)$ = kandungan air bahan fungsi waktu (kg).
- $m_{p,basah}$ = massa bahan awal dalam keadaan basah (kg).
- $m_{p,kering}$ = massa bahan akhir keadaan kering (kg).

b. Kelembaban relatif

Kelembaban relatif adalah perbandingan antara fraksi molekul uap air (tekanan uap air) di dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh (tekanan jenuh uap air) pada temperatur *dry bulb* dan tekanan yang sama. Dari hubungan untuk gas ideal, kelembaban relatif dapat dinyatakan dengan θ , yaitu:

$$\theta = \frac{P_{uap}}{P_s} \quad (2.3)$$

dimana : P_{uap} = tekanan uap air
 P_s = tekanan jenuh uap air pada temperatur yang sama

c. Rasio Kelembaban

Rasio kelembaban (W_{ud}) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Rasio kelembaban udara ditentukan berdasarkan 1 kg udara kering, seperti beberapa sifat yang akan dipelajari.

$$W_{ud} = \frac{m_{uap\ air}}{m_{ud}} \quad (2.4)$$

dimana : W_{ud} = Rasio kelembaban udara (kg/kg)
 $m_{uap\ air}$ = massa uap air yang terkandung (kg_{uap air})
 m_{ud} = massa udara kering (kg_{udara kering})

d. Enthalpi

Enthalpi campuran udara kering dan uap air adalah jumlah dari panas sensibel campuran udara-uap air dan panas latent uap air tiap kg udara kering.

$$h_{ud} = C_p \cdot T_{ud} + W_{ud} \cdot h_g \left(\frac{kJ}{kg_{ud, kering}} \right) \quad (2.5)$$

2.2.4 Prinsip Perpindahan Massa

Dalam proses pengeringan selalu terjadi perpindahan massa uap air dari bahan ke udara pengering. Perpindahan massa yang terjadi selama proses pengeringan, yaitu :

- Perpindahan uap air dari dalam ke permukaan bahan.
- Perpindahan uap air dari permukaan ke udara pengering.

Perpindahan massa dari dalam benda hingga ke permukaan benda terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi. Konsentrasi air pada bagian dalam material lebih besar dari pada konsentrasi air pada permukaan material. Dengan menganggap suatu lapisan tipis, gerakan uap air dari material ke permukaan dapat ditentukan dengan persamaan Fick untuk difusi satu dimensi.

$$N_{wf}'' = -D_{AB} \cdot \left(\frac{\delta C_w}{\delta x} \right) \quad (2.6)$$

$$n_{wf}'' = -D_{AB} \cdot \left(\frac{\delta \rho_w}{\delta x} \right) \quad (2.7)$$

dimana :

$$N_{wf, x}'' = \text{fluks molar uap air} \left(\frac{kg_{mol}}{m^2 \cdot s} \right)$$

$$n_{wf, x}'' = \text{fluks massa uap air} \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right)$$

$$D_{AB} = \text{koefisien difusi binari air dari bahan} \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

$$\frac{\delta C_w}{\delta x} = \text{perbedaan konsentrasi uap air dalam arah } x \left(\frac{kg_{mol}}{m^4} \right)$$

$$\frac{\delta \rho_w}{\delta x} = \text{perbedaan rapat massa uap air dalam arah } x \left(\frac{kg}{m^4} \right)$$

Perpindahan massa dari permukaan benda ke udara pengering dalam proses pengeringan berlangsung secara konveksi. Laju perpindahan massa secara konveksi ditentukan dengan persamaan

$$N_A'' = h_m \cdot (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8 sama dengan persamaan 2.9, dimana penggunaannya tergantung dari nilai variabel yang diketahui.

$$n_A'' = h_m \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.9)$$

dimana :

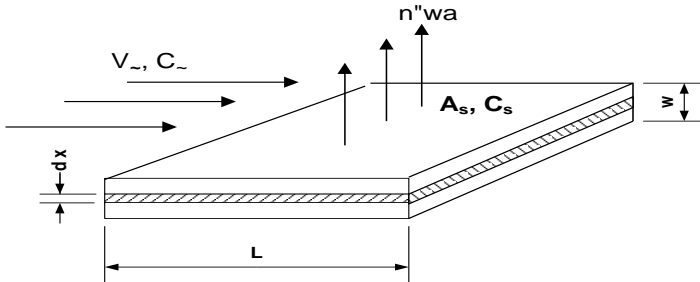
h_m = koefisien konveksi perpindahan massa (m/s).

$C_{A,s}$ = konsentrasi uap air di permukaan bahan (kgmol/m³)

$C_{A,\infty}$ = konsentrasi uap air di medium pengering (kgmol/m³)

$\rho_{A,s}$ = rapat massa uap air di permukaan bahan (kg/m³)

$\rho_{A,\infty}$ = rapat massa uap air di medium pengering (kg/m³)



Gambar 2.17 Skema Perpindahan Massa secara Konveksi

Laju perpindahan panas dan massa berlangsung secara simultan. Pada kondisi *steady*, panas yang berpindah dipergunakan untuk menguapkan air dari material menjadi uap. Hal ini sesuai dengan hubungan :

$$q''_{konveksi} = q''_{evaporasi} \quad (2.10)$$

dari persamaan diatas, panas yang dipindahkan digunakan sebagai panas untuk penguapan bahan, sehingga :

$$h(T_{\infty} - T_s) = h_{fg} h_m (\rho_{A,sat}(T_s) - \rho_{A,\infty}) \quad (2.11)$$

dimana :

h = koefisien konveksi perpindahan panas (W/m^2K).

T_{∞} = Temperatur udara pengering (K).

T_s = Temperatur permukaan produk yang dikeringkan (K)

h_{fg} = panas penguapan air (kJ/kg).

h_m = koefisien konveksi perpindahan massa (m/s).

$\rho_{A,sat}(T_s)$ = massa jenis uap air pada permukaan material (kg/m^3)

$\rho_{A,\infty}$ = massa jenis uap air pada udara pengering (kg/m^3).

2.2.5 Analogi Perpindahan Panas dengan Perpindahan Massa

Analogi antara perpindahan panas dan perpindahan massa bisa digunakan secara langsung untuk menghubungkan antara dua koefisien konveksi yang saling simultan saat terjadi perpindahan panas dan perpindahan massa.

Bilangan Nusselt adalah gradien temperatur *dimensionless* pada permukaan, dirumuskan

$$Nu_L = \frac{hL}{k} \quad (2.12)$$

Bilangan Sherwood merupakan gradien konsentrasi *dimensionless* pada permukaan, dirumuskan

$$Sh_L = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (2.13)$$

Bilangan Prandtl adalah perbandingan antara momentum dan difusivitas panas, dituliskan

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.14)$$

Bilangan Schmidt merupakan perbandingan antara momentum dan difusivitas massa, dirumuskan

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.15)$$

Nu dan Sh sebanding dengan Pr^n dan Sc^n (Incropera & De Witt, 2002) [11] dituliskan sebagai

$$\frac{Nu}{\text{Pr}^n} = \frac{Sh}{\text{Sc}^n} \quad (2.16)$$

$$\frac{hL/k}{\text{Pr}^n} = \frac{h_m L / D_{AB}}{\text{Sc}^n}$$

sehingga

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} \text{Le}^n} = \rho c_p \text{Le}^{1-n} \quad (2.17)$$

Secara umum pada aplikasi teknik digunakan harga $n = 1/3$

Dimana :

h	= heat transfer coefficient (W/m ² .K)
h_m	= mass transfer coefficient (m/s)
k	= thermal conductivity (W/m.K)
D_{AB}	= Diffusivity (m ² /s)
Le	= <i>Lewis number</i>
C_p	= specific heat (J/kg.K)
ρ	= density (kg/m ³)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan – tahapan penelitian pada tugas akhir ini adalah:

1. Studi Kasus

Studi kasus dilakukan untuk mempelajari adanya permasalahan yang ada di UPTI DISPERINDAG Pasuruan. Pada kasus ini lebih membahas tentang ruang pengeringan (*drying chamber*). Studi kasus ini juga dilakukan secara berdiskusi dengan pihak-pihak yang bersangkutan.

2. Studi Literatur

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi, maka dilakukan studi literatur tentang hal yang berkaitan dengan pengeringan material, studi literature tentang simulasi CFD dengan menggunakan software pendukung, serta literatur tinjauan pustaka.

3. Pengumpulan Data

Untuk melakukan simulasi diperlukan adanya data acuan untuk pemodelan dan simulasi dari sistem yang akan ditinjau. Pengumpulan data dilakukan di UPTI DISPERINDAG Pasuruan. Data-data yang diambil berupa dimensi ruang pengeringan (*drying chamber*) serta propertis yang dibutuhkan.

4. Pemodelan dan Simulasi

Pada tahapan ini dibuat model geometri berdasarkan data yang ada. Dalam pembuatan model dan meshing digunakan *Gambit*. Setelah pembuatan model selesai, dilakukan simulasi menggunakan *Fluent* untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.

5. Pengolahan Data Hasil Simulasi

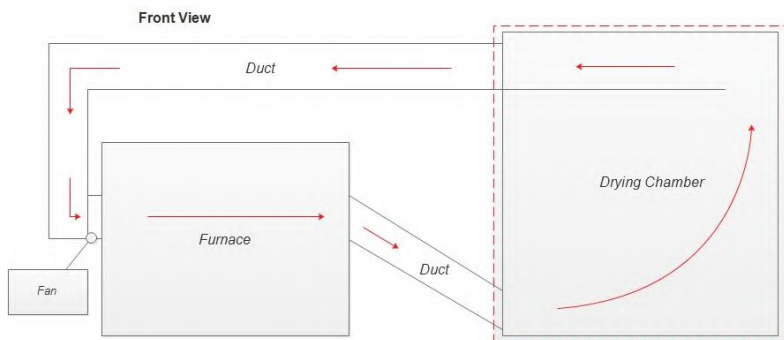
Setelah proses simulasi selesai, dilakukanlah penampilan data berupa data visual yang dapat dianalisa secara kualitatif. Serta, data dalam bentuk grafik yang dapat dianalisa secara kuantitatif. Sehingga dari proses analisa dapat diketahui dan dibahas lebih lanjut mengenai karakteristik perpindahan panas, perpindahan masa dan *relative humidity*.

6. Penyusunan Laporan

Tahapan penelitian serta hasil yang telah dilakukan disusun menjadi satu dalam bentuk laporan yang runtut dan sistematis.

3.2 Permodelan dan Simulasi

Untuk mengetahui karakteristik aliran serta perpindahan panas dan massa pada pengering kayu maka dilakukan pemodelan dan meshing menggunakan *Gambit* dan simulasi menggunakan *Fluent*.

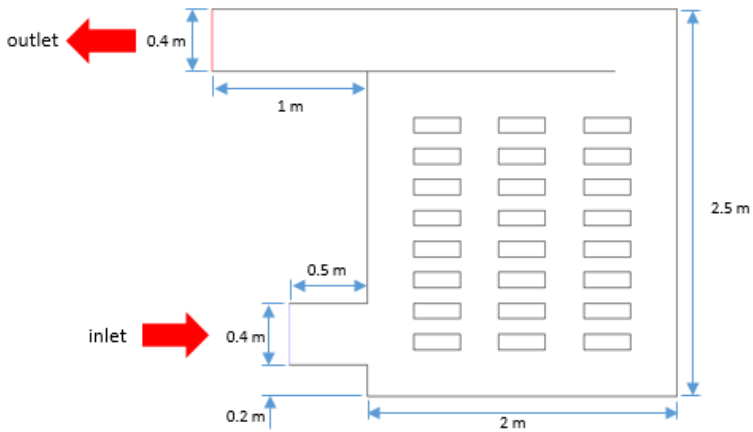


Gambar 3.1 Skema sistem pengeringan kayu

Pada proses ini terbagi menjadi tiga tahapan yaitu: pre-processing, processing, dan post processing.

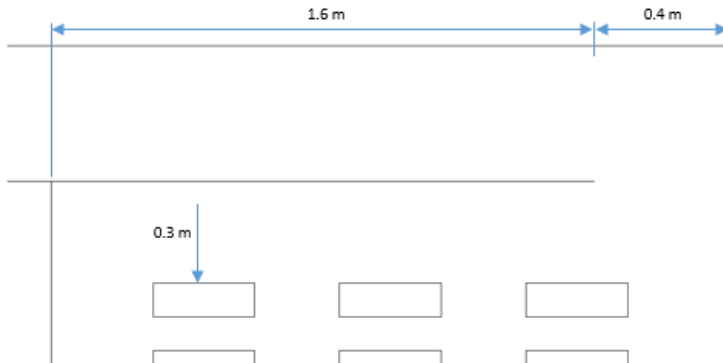
3.2.1 *Pre-processing*

Pada tahap awal ini dilakukan modelling geometri dua dimensi pengering kayu. Pembuatan model dimensi ini dilakukan dengan menggunakan *software Gambit*. Dalam membuat geometri model penentuan dimensi mengacu pada data yang didapat. Adapun spesifikasi dari *drying chamber* mempunyai lebar 2 m dan tinggi 2.5 m. Berikut adalah skema *drying chamber* pada sistem pengeringan kayu :



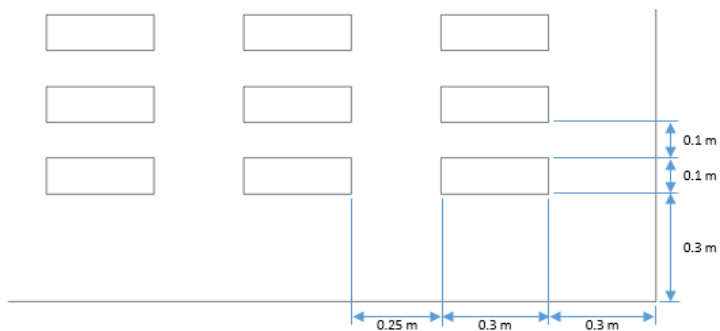
Gambar 3.2 *Drying Chamber Geometry*

Pada gambar di atas memperlihatkan gambar dari *drying chamber* dan skema alirannya. Untuk arah alirannya digambarkan sesuai dengan panah berwarna merah. Pada *inlet* diperpanjang 0.5 m dan pada *outlet* diperpanjang 1 m. Hal ini dilakukan agar aliran yang masuk dan keluar *drying chamber* mempunyai karakteristik *fully developed flow*, agar hasil yang didapat setelah simulasi menjadi baik.



Gambar 3.3 Detail dinding bagian atas

Bagian atas ditambahi dinding sepanjang 1.6 m seperti pada gambar di atas. Tujuan ditambahnya dinding ini agar aliran yang masuk tidak langsung keluar, dikarenakan posisi *inlet* dan *outlet* berada pada sisi yang sama. Jarak dinding atas ke dinding luar yaitu 0.4 m dan jarak dinding atas ke kayu paling atas 0.3 m.



Gambar 3.4 Dimensi dan jarak antar kayu

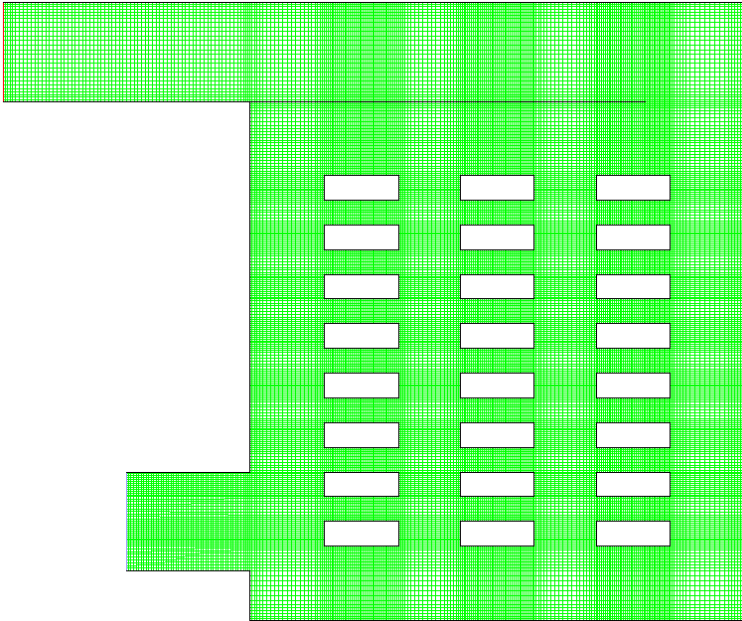
Susunan kayu	
Lebar	0.3 m
Tinggi	0.1 m
Banyak kayu	24

Tabel 3.1 Detail susunan kayu



Gambar 3.5 Susunan kayu di Pasuruan

Pada gambar di atas dapat dilihat detail dari susunan kayu. Dapat diketahui bahwa kayu mempunyai susunannya sendiri. Dengan dimensi kayu 0.3 m x 0.1 m sebanyak 24 buah. Jarak antar kayu secara horizontal 0.25 m sedangkan secara vertical 0.1 m dan jarak dari kayu ke setiap dinding 0.3 m. Detail ini ditentukan berdasarkan susunan kayu di Pasuruan yang mempunyai celah yang sama antara susunan kayu terhadap dinding bagian atas, bawah dan samping sehingga pada pemodelan terlihat lebih renggang dibandingkan pada Pasuruan.



Gambar 3.6 *Drying chamber Meshing*

Setelah geometri selesai dibuat maka dilakukanlah tahap *meshing*. Tahap *meshing* dilakukan menggunakan *software Gambit*. Fungsi dari *meshing* ini untuk membagi geometri menjadi beberapa bagian kecil yang selanjutnya akan dilakukan perhitungan secara komputasi. Untuk daerah *meshing* di sekitar kayu dibuat rapat agar perubahan kecil yang terjadi dapat terekam. Hasil *meshing* dapat dilihat pada gambar di atas. *Total cell meshing* tersebut adalah 41999 dengan *wall treatment enhanced* dan *Yplus* 66.75736.

3.2.2 *Processing*

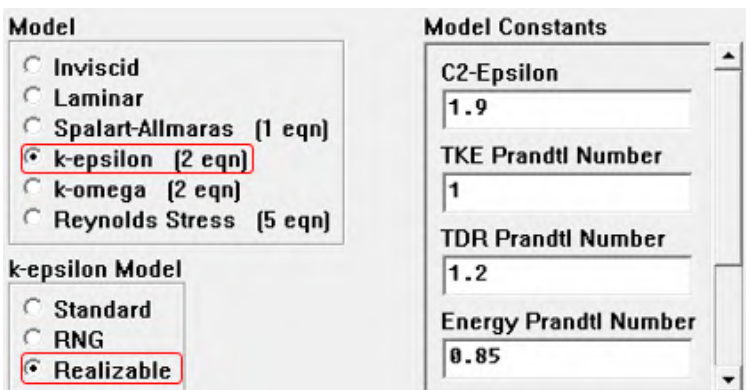
Processing merupakan proses kedua dalam simulasi CFD, yakni melakukan simulasi berdasarkan hasil *meshing* dari domain sistem menggunakan *software Fluent*. Hal yang dilakukan diantaranya mengatur *solver*, *species*, *materials*, *boundary*

conditions, *operating conditions*, *control and monitoring conditions* dan *initialize conditions*. Setelah dilakukan pengaturan, dapat dimulai proses iterasi untuk menyelesaikan simulasi. Di bawah ini merupakan penjelasan lebih lanjut mengenai hal-hal yang harus ditentukan dalam *processing*:

1. Memilih *Solver*

Pada saat membuka *Fluent* terdapat pilihan untuk menggunakan solver 2D/3D dengan keakuratan tunggal atau ganda (*single precision/double precision*). Untuk penelitian ini menggunakan *2ddp* (*two dimensional double precision*) karna geometrinya dua dimensi dan juga agar hasil yang didapat nanti baik.

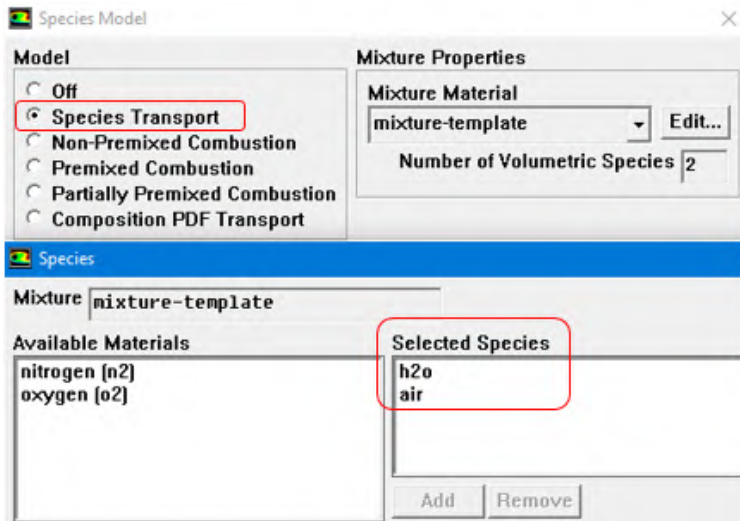
2. Pemilihan *Turbulence Modelling*



Gambar 3.7 Penentuan *viscous model* pada *Fluent*

Referensi penentuan *Turbulence Modelling* pada penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh **Muh. Muhakkikin Faizy (2013)**. Pada penelitian terdahulu digunakan *Turbulence Modelling realizable k-epsilon model*. Sehingga model turbulence ini digunakan sebagai acuan penulis dalam pengambilan data.

3. Pemilihan *Species*



Gambar 3.8 Penentuan *species transport* pada *Fluent*

Pada penelitian ini juga digunakan *species transport*. Pemodelan *species transport* digunakan untuk memodelkan kondisi perpindahan massa yang terjadi pada permukaan batubara yang mengandung fraksi massa air (H_2O).

4. Pemilihan *Material*

The screenshot shows the 'Materials' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field is set to 'oak'. The 'Material Type' is set to 'solid'. The 'Chemical Formula' field is empty. The 'Fluent Solid Materials' list shows 'oak' selected. The 'Mixture' field is set to 'none'. The 'Properties' section shows three properties defined as 'constant': Density (kg/m3) is 720, Cp (J/kg-K) is 1255, and Thermal Conductivity (W/m-K) is 0.207. Each property has an 'Edit...' button next to it.

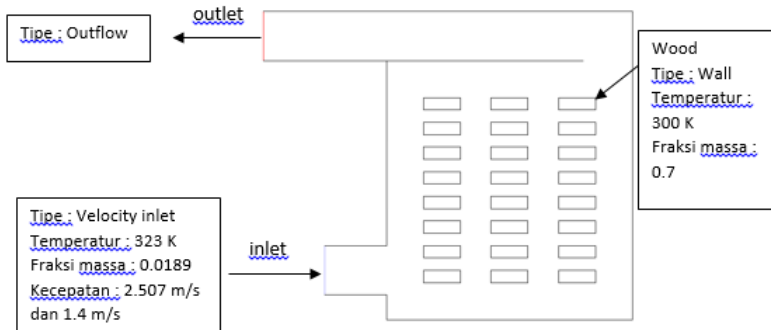
Property	Value
Density (kg/m3)	720
Cp (J/kg-K)	1255
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.207

Gambar 3.9 Penentuan *material* pada *Fluent*

Pada *tab* material memilih material yang akan digunakan. Material yang akan digunakan adalah *oak* dengan *MC* (*Moisture Content*) 70%. Karena pada *Fluent* tidak tersedia, maka material tersebut harus dimasukkan secara manual. Dari *Handbook of Industrial Drying (4th Edition)* didapat propertis *oak* yaitu *density* = 720 kg/m³, *Cp* = 1255 J/kg.k dan *thermal conductivity* = 0.207 (W/m.k).

5. *Boundary Condition*

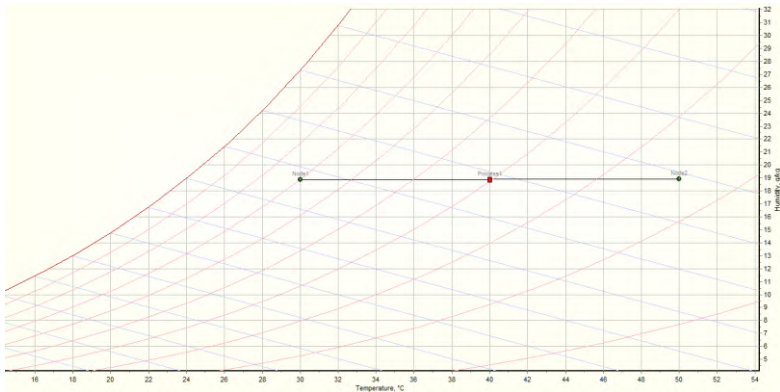
Dalam mendefinisikan suatu kasus, harus memasukkan informasi pada variable aliran pada domain kasus tersebut. Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas yang digunakan. Dalam simulasi ini menggunakan batas kondisi sebagai berikut :



Gambar 3.10 Penentuan *Boundary Condition*

Dalam simulasi ini akan divariasikan velocity inlet 2.507 m/s dan 1.4 m/s dan juga proses pengeringan. Proses pengeringan pada simulasi ini adalah dengan mensimulasikan terus menerus hingga fraksi massa kayu menjadi kurang dari 0.15. Untuk itu pada setiap simulasinya dihitung berapakah fraksi massa kayunya pada waktu tertentu dan dimasukkan dalam *boundary condition* simulasi berikutnya. Pada variasi proses pengeringan ada dua proses yaitu *one through* dan *circulated*. Pada proses *one through* fraksi massa pada inlet tetap yaitu 0.0189 sedangkan pada proses *circulated* fraksi massa berubah-ubah dan relatif semakin naik sesuai dengan data yang didapat dari outlet simulasi sebelumnya. Perhitungan nilai-nilai *boundary condition* di atas, diuraikan sebagai berikut :

- Temperatur rata-rata udara di Surabaya adalah 30°C dengan kelembaban 70%. Temperatur *inlet* ruang pengering 50°C, untuk mencari fraksi massanya diperlukan *pschometric chart*.



Gambar 3.11 Penentuan *inlet* fraksi massa

Temperatur 30°C dengan RH 70% mempunyai fraksi massa 0.0189, sedangkan pada inlet ruang pengering telah diatur temperature 50°C. Pada titik pertama ditarik garis lurus mendatar ke kanan (udara dipanaskan dari 30°C - 50°C) sampai titik 50°C, didapat fraksi massa tetap 0.0189 tetapi RH udara menurun menjadi 24%.

- Pada skema sistem pengeringan kayu terlihat bahwa sistem pengeringan menggunakan *fan*. Ada dua *spec fan* yaitu dengan debit 3610 CMH dan 2010 CMH.

1. Debit 3610 CMH di konversikan menjadi *velocity* :

$$v = Q \times \frac{1}{A} \times \frac{1 h}{3600 s}$$

$$v = 3610 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{1}{(0.4 \times 1) \text{ m}^2} \times \frac{1 h}{3600 s}$$

$$v = 2.504 \text{ m/s}$$

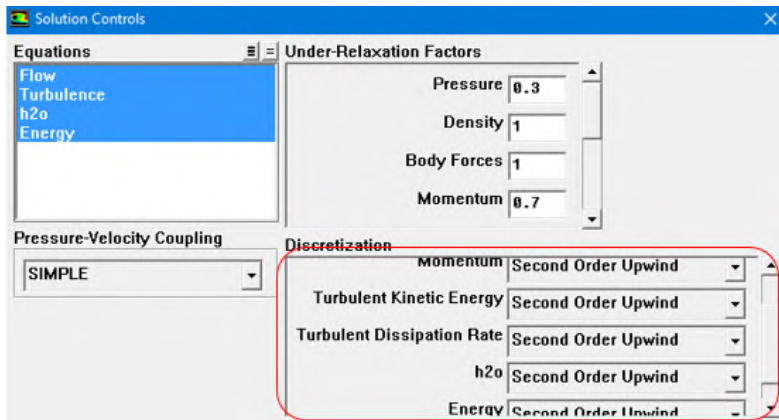
2. Debit 2010 CMH di konversikan menjadi *velocity* :

$$v = Q \times \frac{1}{A} \times \frac{1 h}{3600 s}$$

$$v = 2010 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{1}{(0.4 \times 1) \text{ m}^2} \times \frac{1 h}{3600 s}$$

$$v = 1.4 \text{ m/s}$$

6. Solution



Gambar 3.12 Penentuan *Solution Controls*

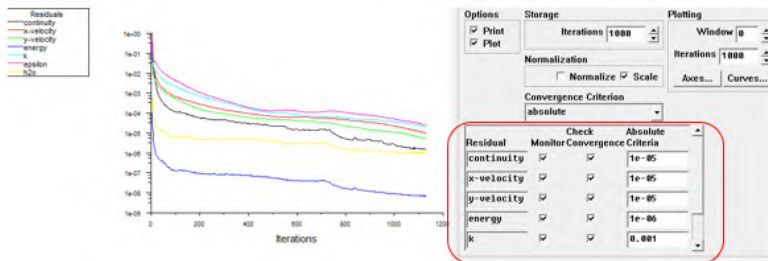
Pada *Solution Controls* mengubah *Momentum*, *Turbulent Kinetic Energy*, *Turbulent Dissipation Rate*, *h2o* dan *Energy* menjadi *Second Order Upwind*.

7. Initialize

Initialize merupakan tebakan awal agar lebih memudahkan untuk konvergen dan diinputkan dari inlet.

8. Iterasi

Yaitu proses perhitungan yang berulang-ulang dari kondisi batas yang diberikan sampai konvergensi tercapai. Untuk menyimpulkan hasil iterasi telah konvergen atau belum tidak cukup hanya dengan mengamati level residual, tapi juga harus mengamati kesetimbangan / balans massa dan energy. Terdapat metode yang umum dipakai untuk mengecek konvergensi hasil iterasi, yaitu Residual Konvergensi. Residual Konvergensi adalah berhentinya iterasi karena sudah mencapai kriteria konvergensi yang telah ditentukan.



Gambar 3.13 Penentuan *Residual*

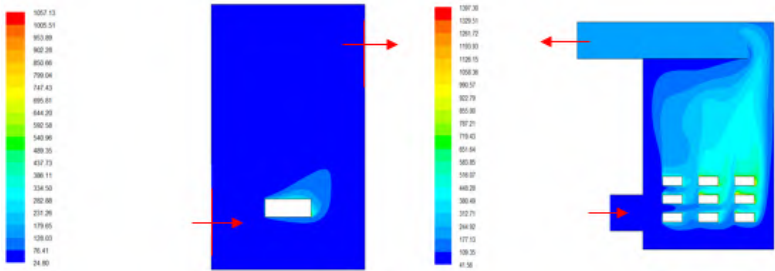
Residual yang digunakan yaitu $1e-05$, begitu pula dengan x-velocity dan y-velocity diatur $1e-05$. Untuk energy dan h2o diatur lebih teliti $1e-06$, karena dibutuhkan ketelitian lebih untuk energy dan h2o agar hasilnya baik.

Pemilihan Solver		Material (oak)		Discretization		Monitor Residuals	
Solver	2ddp,steady	Density	720 kg/m ³	Pressure	Second Order Upwind	Continuity	1×10^{-5}
Viscous	Realizable k-epsilon	Cp	1255 j/kg-k	Momentum	Second Order Upwind	X-velocity	1×10^{-5}
Energy	diaktifkan	Thermal Conductivity	0.207 w/m-k	Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind	Y-velocity	1×10^{-5}
Species transport	h2o dan air			Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind	h2o	1×10^{-6}
				h2o	Second Order Upwind	energy	1×10^{-5}
				energy	Second Order Upwind		

Tabel 3.2 Detail penentuan *Fluent*

Untuk detail simulasi dengan menggunakan *software Fluent* dapat dilihat pada tabel 3.2 di atas. Untuk mengetahui pengaruh simulasi terhadap waktu, penentuan *time step* pada variasi dengan *velocity inlet* 2.507 m/s menggunakan *time step* 3h

atau 10800s. Lalu pada variasi dengan *velocity inlet* 1.4 m/s menggunakan *time step* 4 jam atau 14400s.



Gambar 3.14 *Relative humidity* lebih dari 100%

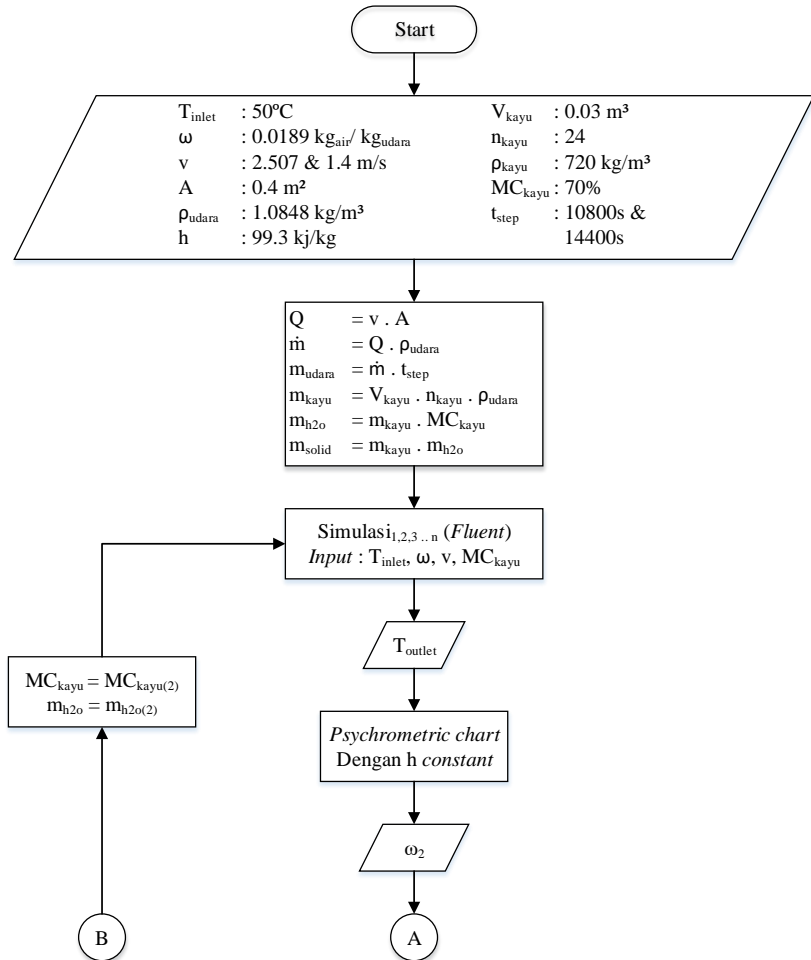
Penulis sudah mencoba mensimulasikan terlebih dahulu, hasil simulasi dapat dilihat pada gambar di atas. Dapat dilihat pada gambar di sebelah kiri penulis mencoba mensimulasikan hanya dengan 1 kayu, diketahui *relative humidity* pada *outlet* 76.41%. Lalu pada gambar sebelah kanan penulis mencoba mensimulasikan dengan 9 kayu, hasilnya *relative humidity* pada *outlet* mencapai lebih dari 100%. Untuk itu dari hasil simulasi penulis hanya mengambil temperatur pada outlet dan menambahkan asumsi *enthalpy constant* pada *psychrometric chart* untuk mendapatkan hasil karakteristik pengeringan.

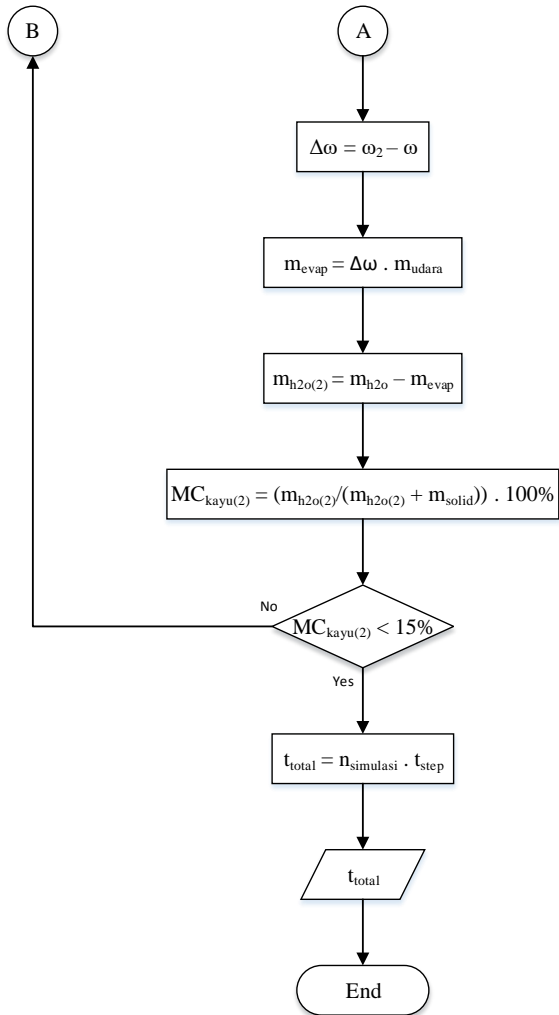
3.2.3 *Post Processing*

Dari hasil simulasi, diperoleh data kualitatif dan dapat dilihat kontur temperature dan kontur fraksi massa dalam ruang pengering kayu. Data kualitatif yang diperoleh akan dianalisa untuk melihat karakteristik pengeringannya. Data kuantitatif didapatkan dengan melakukan ekstrasi data pada hasil simulasi. Pada simulasi ini data yang diperoleh berupa temperatur. Data ini lalu diolah dengan menggunakan *software psyChart* dan *Microsoft Excel* untuk mendapatkan perubahan *moisture content* dan laju pengeringan kayu terhadap waktu.

3.3 Flowchart Penelitian

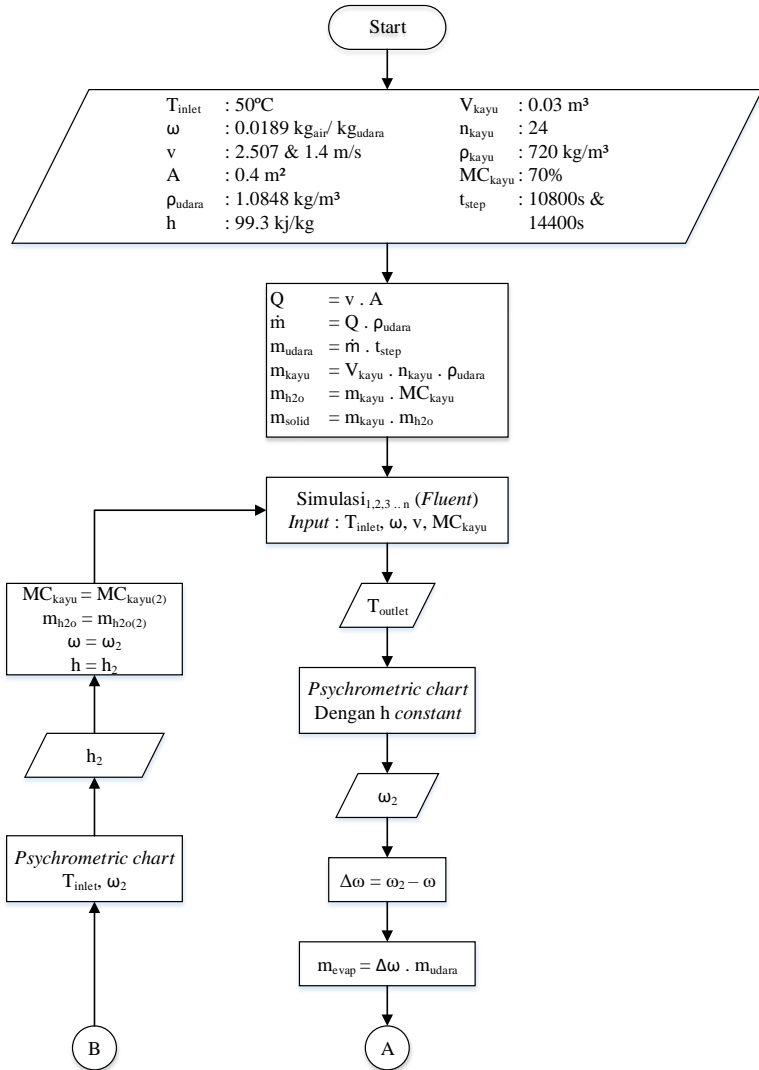
3.3.1 One Through

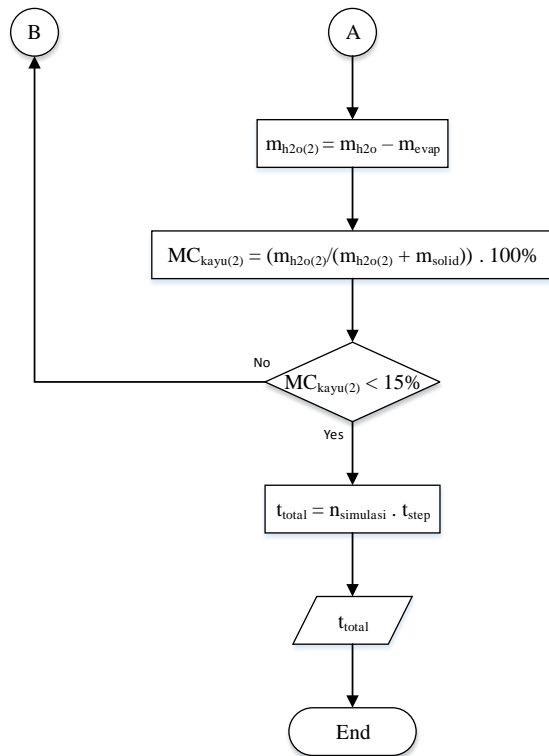




Gambar 3.15 *Flowchart* sistem pengeringan secara *one through*

3.3.2 Circulated





Gambar 3.16 *Flowchart* sistem pengeringan secara *circulated*

BAB IV

ANALISA DATA DAN DISKUSI

4.1 Contoh Perhitungan

Pada penelitian ini, proses simulasi dilakukan dengan memvariasikan *velocity inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s serta variasi proses pengeringan *one through* dan *circulated*. Analisa data hasil simulasi dilakukan dengan perhitungan yang didapat dari data sebagai berikut :

1. *Velocity inlet* (2.507 m/s dan 1.4 m/s) didalam contoh perhitungan diambil 2.507 m/s.
2. *Inlet temperature* 50°C = 323 K
3. ω_{inlet} (*inlet omega*) $0.0189 \frac{kg H_2O}{kg udara}$
4. Temperatur kayu 300 K
5. Kandungan air pada kayu 70 %
6. Banyaknya kayu 24 buah
7. ρ_{udara} (*inlet density*) 1.0848 kg/m³
8. ρ_{oak} (*oak density*) 720 kg/m³
9. h_{inlet} (*inlet enthalpy*) 99.3 kJ/kg
10. *Enthalpy constant*
11. *Time step* per 3 jam (10800 s) untuk variasi v =2.507 m/s dan 4 jam (14400 s) untuk variasi v = 1.4 m/s
12. $Cp_{udara} = 1.008$ kJ/kg.K
13. $h_{fg} = 2382.7$ kJ/kg

4.1.1 Menghitung Massa Udara yang Masuk ke *Drying Chamber*

- Menghitung volume *flowrate* :
 $Q = v \cdot A$
 $Q = 2.507 \text{ m/s} \cdot (0.4 \cdot 1) \text{ m}^2$
 $Q = 1.0028 \text{ m}^3/\text{s}$

- Menghitung *mass flowrate* :
 $\dot{m} = \rho_{udara} \cdot Q$
 $\dot{m} = 1.0848 \text{ kg/m}^3 \cdot 1.0028 \text{ m}^3/\text{s}$
 $\dot{m} = 1.087837 \text{ kg/s}$

4.1.2 Menghitung Massa Kayu

- Total massa kayu :
 $m_{kayu} = V_{kayu} \cdot \rho_{oak}$
 $m_{kayu} = (0.1 \cdot 0.3 \cdot 1) \text{ m}^3 \cdot 720 \text{ kg/m}^3$
 $m_{kayu} = 518.4 \text{ kg}$
- Massa H_2O kayu :
 $m_{H_2O \text{ kayu}} = m_{kayu} \cdot MC_{kayu}$
 $m_{H_2O \text{ kayu}} = 518.4 \text{ kg} \cdot 0.7$
 $m_{H_2O \text{ kayu}} = 362.88 \text{ kg}$
- Massa solid kayu :
 $m_{solid} = m_{kayu} - m_{H_2O \text{ kayu}}$
 $m_{solid} = 518.4 \text{ kg} - 362.88 \text{ kg}$
 $m_{solid} = 155.52 \text{ kg}$

4.1.3 Perhitungan Setelah Simulasi

Setelah melakukan simulasi menggunakan *software fluent* dengan *boundary condition* yang sudah ditentukan, didapatkan data temperature pada outlet sebesar $316.1 \text{ K} = 43.1^\circ\text{C}$. Lalu menggunakan *psychrometric chart* dengan temperatur 43.1°C dan *enthalpy constant* yaitu sebesar 99.3 kJ/kg di dapat $\omega_{outlet} = 0.0217 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg udara}}$. Dari data tersebut dilakukan perhitungan, sebagai berikut :

- Massa udara yang masuk pada 10800s :
 $m_{udara \text{ 10800s}} = \dot{m} \cdot 10800 \text{ s}$
 $m_{udara \text{ 10800s}} = 1.087837 \text{ kg/s} \cdot 10800 \text{ s}$
 $m_{udara \text{ 10800s}} = 11748.64 \text{ kg}$

- Massa H_2O yang ter-evaporasi :

$$m_{evap} = m_{udara\ 10800s} \cdot (\omega_{outlet} - \omega_{inlet})$$

$$m_{evap} = 11738.64\ \text{kg udara} \cdot (0.0217 - 0.0189)$$

$$\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg udara}}$$

$$m_{evap} = 32.8962\ \text{kg}$$
- Massa H_2O kayu pada 10800s :

$$m_{H_2O\ kayu\ 10800s} = m_{H_2O\ kayu} - m_{evap}$$

$$m_{H_2O\ kayu\ 10800s} = 362.88\ \text{kg} - 32.8962\ \text{kg}$$

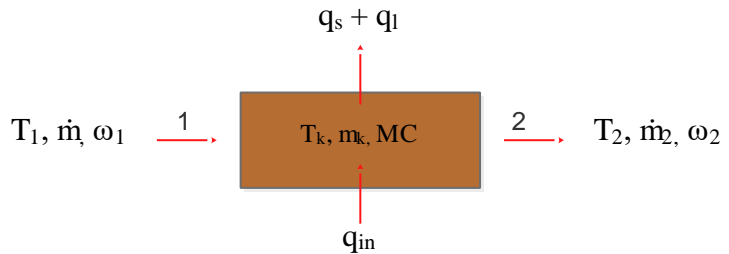
$$m_{H_2O\ kayu\ 10800s} = 329.9838\ \text{kg}$$
- *Moisture content* kayu pada 10800s :

$$MC_{kayu} = \frac{m_{H_2O\ kayu\ 10800s}}{m_{H_2O\ kayu\ 10800s} + m_{solid}} \cdot 100\%$$

$$MC_{kayu} = \frac{329.9838\ \text{kg}}{329.9838\ \text{kg} + 155.52\ \text{kg}} \cdot 100\%$$

$$MC_{kayu} = 67.97\ \%$$

4.1.4 Heat and mass balance



Gambar 4.1 *Heat and mass balance*

- *Heat balance*
 Untuk perhitungan *heat balance* dapat dilihat dari gambar di atas, lalu di hitung seperti ini :

$$\begin{aligned}
 q_{in} &= q_s + q_l \\
 \dot{m}_{ud} \cdot C_{pud} \cdot (T_1 - T_2) &= \dot{m}_k \cdot C_{pk} \cdot (T_{k2} - T_{k1}) + \dot{m}_k \cdot h_{fg} \cdot (MC_2 - MC_1) \\
 1.08 \text{ kg/s} \cdot 1.008 \text{ kJ/kg.K} \cdot 7 \text{ K} &= 0.144 \text{ kg/s} \cdot 1.255 \text{ kJ/kg.K} \cdot 3 \text{ K} \\
 &\quad + 0.144 \text{ kg/s} \cdot 2.3827 \text{ kJ/kg} \cdot 0.02 \\
 7.56 \text{ kJ/s} &= 7.56 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

- *Mass balance*

Mass balance juga dapat dilihat melalui skema gambar di atas, lalu dihitung seperti ini :

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{ud} \cdot (\omega_2 - \omega_1) &= \dot{m}_k \cdot (MC_2 - MC_1) \\
 1.08 \text{ kg/s} \cdot (0.0217 - 0.0189) &= (518.4 \text{ kg/3600 s}) \cdot (0.7 - 0.6796) \\
 3.024 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} &= 3.024 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

4.1.5 Menghitung panas yang dibutuhkan pengering

$$\begin{aligned}
 q_{in} &= \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \\
 q_{in} &= 1.087837 \text{ kg/s} \cdot 1.008 \text{ kJ/kg.K} \cdot (323 - 316.1) \text{ K} \\
 q_{in} &= 7.56 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

4.1.6 Boundary Condition untuk Simulasi Selanjutnya

Dari hasil simulasi serta perhitungan pertama digunakan untuk melakukan running selanjutnya. Untuk proses pengeringan *one through* hanya merubah *MC* kayu dengan hasil perhitungan di atas. Lalu pada proses pengeringan *circulated* tidak hanya merubah *MC* kayu tetapi juga menggunakan *psychrometric chart* untuk menentukan ω_{inlet} dan h_{inlet} untuk simulasi berikutnya. Dan proses ini terus berlanjut sampai tercapai *MC* kayu dibawah 15%, lalu didapat lamanya pengeringan dari jumlah *time step* yang telah ditentukan.

4.2 Analisa Kualitatif Karakteristik Pengeringan

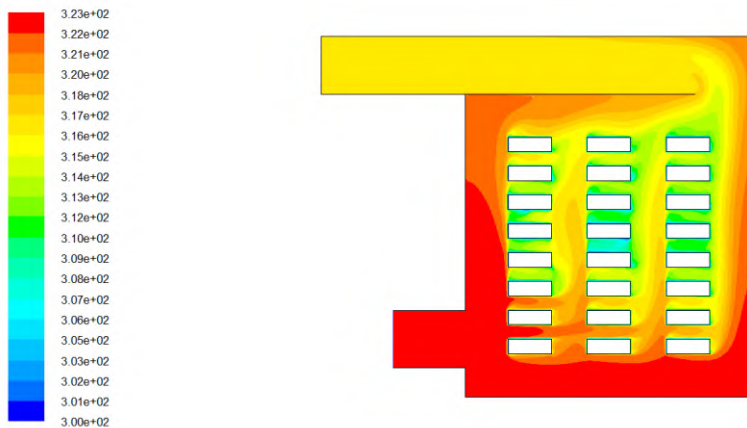
Pada penelitian dengan simulasi, dapat diketahui berbagai profil kontur selama dilakukannya pengambilan data. Pada simulasi ini, akan dianalisa kontur temperature dan fraksi massa

H_2O di dalam *drying chamber* untuk mengetahui karakteristik pengeringan kayu. Untuk variasi sistem pengeringan *one through* dan *circulated* pada *velocity inlet* yang sama kontur terlihat relatif sama, karena dari itu penulis tidak membahas perbedaan kontur pada variasi sistem pengeringan.

4.2.1 Analisa Kontur Temperatur terhadap Variasi *Velocity Inlet*

Parameter yang digunakan dalam simulasi ini adalah variasi pada *velocity inlet*. Perubahan *velocity inlet* mempengaruhi proses pengeringan yang terjadi di dalam *drying chamber*, yang mengakibatkan perubahan karakteristik pengeringan kayu.

4.2.1.1 Kontur Temperatur pada *Velocity Inlet* 2.507 m/s



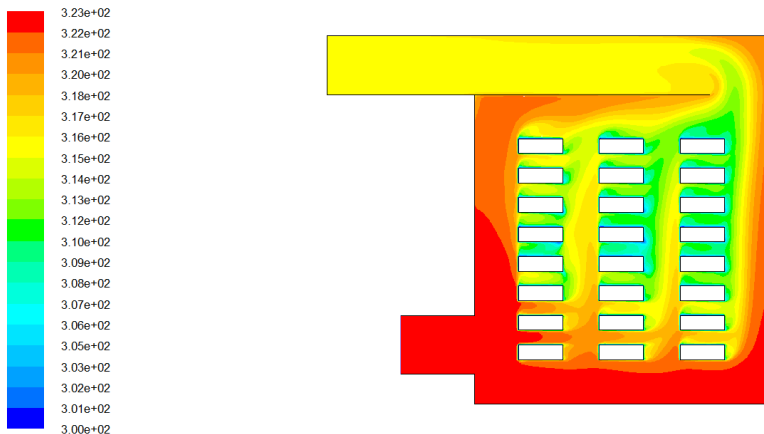
Gambar 4.2 Kontur temperatur pada variasi *velocity inlet* 2.507 m/s

Berdasarkan hasil simulasi, terlihat kontur temperatur di dalam *drying chamber* mengalami penurunan saat melewati *drying chamber*. Penurunan ini ditandai dengan perubahan warna dari merah pada *inlet* menjadi warna kuning pada *outlet*, dimana warna

merah merupakan *range* tertinggi dan *range* warna kuning berada dibawah *range* warna merah.

Perubahan temperatur udara masuk dengan udara keluar *drying chamber* mengalami penurunan temperature yang cukup signifikan. Penurunan temperature dikarenakan adanya perpindahan panas antara udara kering dengan kayu. Pada kontur temperatur di atas juga dapat dilihat bahwa panas yang masuk ke dalam *drying chamber* sudah cukup merata, terlihat warna jingga dan warna kuning mendominasi disekitar kayu.

4.2.1.2 Kontur Temperatur pada *Velocity Inlet* 1.4 m/s



Gambar 4.3 Kontur temperatur pada variasi *velocity inlet* 1.4 m/s

Penurunan temperatur udara pengering juga terjadi pada simulasi dengan menggunakan udara *inlet* pada variasi *velocity inlet* 1.4 m/s. Perbedaan yang dapat dilihat dari kontur *velocity inlet* 2.507 m/s terhadap *velocity inlet* 1.4 m/s adalah pada kondisi temperatur *drying chamber* dengan menggunakan *velocity inlet* 1.4 m/s lebih rendah dibandingkan *velocity inlet* 2.507 m/s. Perbedaan itu dapat dilihat dari warna merah yang lebih sedikit pada *drying chamber* dan pada *outlet* warnanya lebih kuning.

Perubahan temperatur udara masuk dengan udara keluar *drying chamber* pada variasi ini juga mengalami penurunan

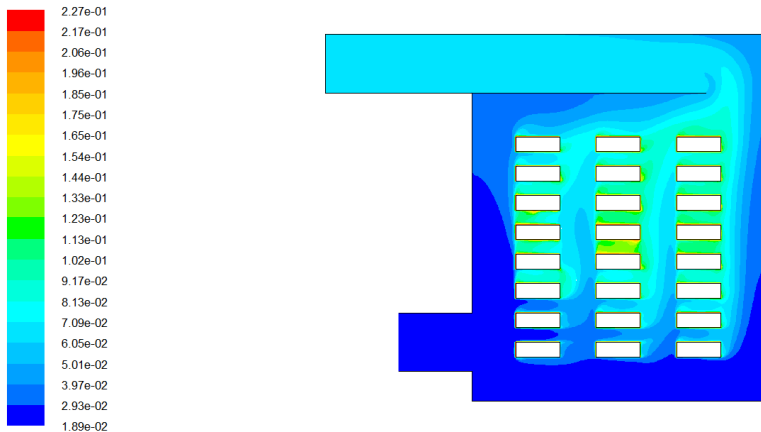
temperatur yang cukup signifikan. Penurunan temperatur tersebut tentunya dikarenakan adanya perpindahan panas antara udara kering dengan kayu. Pada variasi ini panas yang berada di dalam *drying chamber* juga terlihat merata, hanya saja terlihat temperaturnya lebih rendah. Dapat dilihat kontur disekitar kayu didominasi oleh warna hijau, yang menandakan bahwa temperatur kontur berwarna hijau lebih rendah dibandingkan temperature kontur yang berwarna jingga dan kuning.

Dari analisa kontur temperatur di dalam *drying chamber* dapat disimpulkan bahwa pada semua variabel temperature yang digunakan pada temperatur *inlet* mengalami penurunan seiring berjalannya proses pengeringan secara kontinyu pada *drying chamber*.

4.2.2 Analisa Kontur Fraksi Massa H_2O terhadap Variasi Velocity Inlet

Variasi yang digunakan pada simulasi ini yaitu *velocity inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s. Dari kontur hasil simulasi dapat dilihat bagaimana pengaruh *velocity inlet* terhadap fraksi massa pada proses pengeringan.

4.2.2.1 Kontur Fraksi Massa H_2O pada *Velocity Inlet* 2.507 m/s



Gambar 4.4 Kontur fraksi massa H_2O pada variasi *velocity inlet* 2.507 m/s

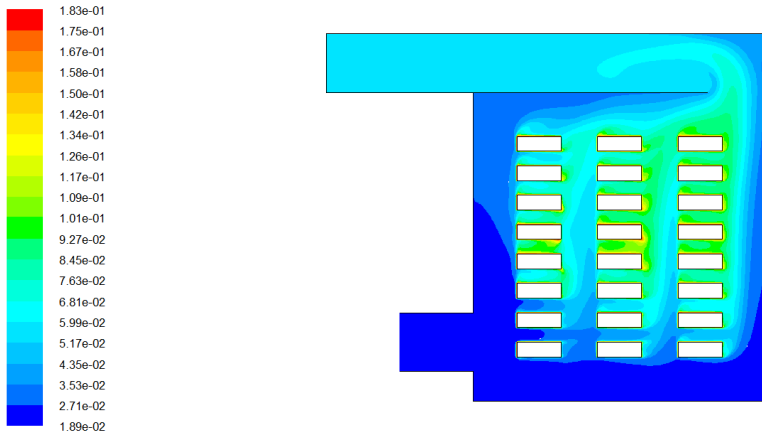
Pada hasil simulasi pengeringan kayu didapatkan juga gambar kontur fraksi massa H_2O di dalam *drying chamber*. Pada gambar di atas dapat dilihat terjadi perubahan warna yang mengartikan terjadinya perubahan fraksi massa selama proses pengeringan di dalam *drying chamber*.

Saat udara pengering melewati *drying chamber*, udara pengering mengalami peningkatan kandungan air atau jumlah fraksi massa air. Peningkatan tersebut dapat dilihat pada gambar kontur fraksi massa H_2O di atas. Saat udara memasuki *drying chamber* kontur masih berwarna biru tua sedangkan saat keluar *drying chamber* kontur fraksi massa H_2O berwarna lebih muda dibandingkan warna sekitar *inlet*, yang mengartikan jumlah kandungan air atau fraksi massa H_2O pada udara *outlet* relatif lebih banyak dibandingkan fraksi massa H_2O pada udara *inlet*.

Terjadinya peningkatan jumlah kandungan H_2O pada udara pengering merupakan fenomena pengeringan, dimana peningkatan tersebut dikarenakan penambahan jumlah kandungan H_2O atau penyerapan H_2O dari sejumlah kandungan H_2O pada

kayu di dalam *drying chamber*. Untuk hasil simulasi ini terlihat kayu sudah cukup kering, dapat dilihat kontur disekitar kayu didominasi oleh warna biru yang menandakan bahwa fraksi massa H_2O di daerah itu sudah cukup rendah.

4.2.2.2 Kontur Fraksi Massa H_2O pada *Velocity Inlet* 1.4 m/s



Gambar 4.5 Kontur fraksi massa H_2O pada variasi *velocity inlet* 1.4 m/s

Peningkatan fraksi massa H_2O udara pengering juga terjadi pada simulasi dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s. Kontur yang dihasilkan dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s relatif sama pada *inlet* dan *outlet*-nya, hanya saja pada daerah disekitar kayu terlihat sedikit berbeda. Pada variasi ini terlihat warna hijau yang mendominasi, ini menandakan bahwa udara daerah sekitar kayu masih cukup basah. Warna yang lebih hijau menunjukkan bahwa udara mengandung H_2O relatif lebih banyak, ini menandakan kayu pada variasi ini sedikit lebih kering dibandingkan dengan variasi dengan *velocity inlet* 2.507 m/s.

Pada proses pengeringan, perpindahan massa dapat ditunjukkan dengan adanya perubahan fraksi massa atau penambahan *humidity ratio*. Pada saat masuk udara kering

memiliki *humidity ratio* sebesar $0.0189 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg udara}}$ dan mengalami penambahan hingga pada saat keluar *drying chamber humidity ratio* udara menjadi $0.0217 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg udara}}$. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya perpindahan massa dengan laju perpindahan massa yang dapat dihitung dengan persamaan di bawah.

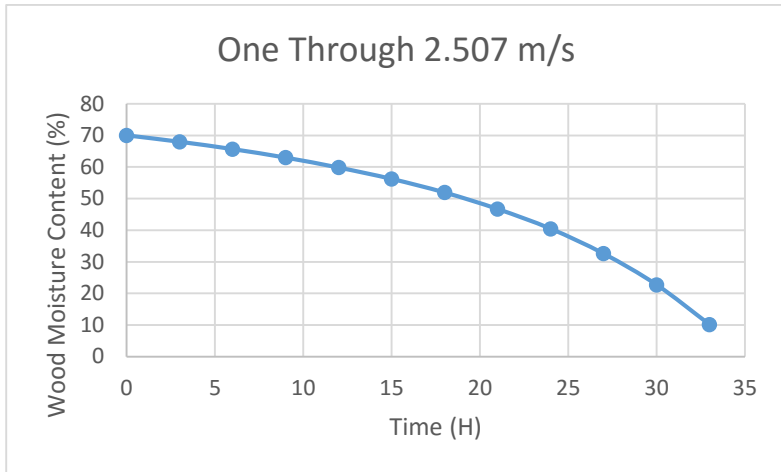
$$n_A'' = \dot{m} \cdot (\omega_{\text{outlet}} - \omega_{\text{inlet}}) \dots \dots \dots (4.1)$$

4.3 Analisa Kuantitatif Karakteristik Pengeringan

Berdasarkan data yang didapat dari pengolahan hasil simulasi, akan dianalisa parameter pengeringan pada *drying chamber*. Parameter pengeringan akan dianalisa secara kuantitatif sehingga dapat dijadikan sumber analisa dalam menentukan karakteristik pengeringan kayu pada *drying chamber*. Data yang akan dibahas dalam analisa karakteristik pengeringan pada *drying chamber* berupa perubahan *moisture content* pada kayu dan *drying rate* yang akan diulas secara kuantitatif dari hasil data simulasi yang didapatkan. Analisa karakteristik pengeringan secara kuantitatif digunakan untuk memperkuat bahasan dalam penelitian ini terkait karakteristik pengeringan yang terjadi pada *drying chamber*.

4.3.1 Analisa Perubahan *Moisture Content* Kayu terhadap *Time Step*

4.3.1.1 Grafik *Moisture Content* Kayu terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet* 2.507 m/s dengan Proses Pengeringan *One Through*

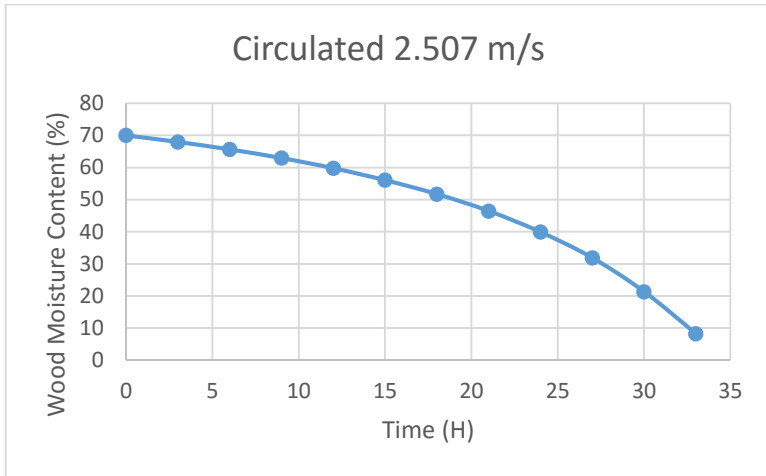


Gambar 4.6 Perubahan *moisture content* kayu terhadap waktu pada *velocity inlet* 2.507 m/s dengan proses pengeringan *one through*

Berdasarkan grafik di atas didapatkan trend grafik perubahan *moisture content* kayu terhadap waktu pengeringan pada *velocity inlet* 2.507 m/s dengan proses pengeringan *one through*. Dapat dilihat bahwa proses pengeringan ini membutuhkan waktu 33 jam untuk mengeringkan kayu dengan MC 70 % menjadi 10.09 %.

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa *moisture content* cenderung menurun secara konstan sampai dengan 15 jam waktu pengeringan, setelah itu *moisture content* terlihat semakin menurun dengan cepat. Hal ini disebabkan oleh massa H_2O kayu yang semakin dikit membuat *moisture content* kayu semakin kecil.

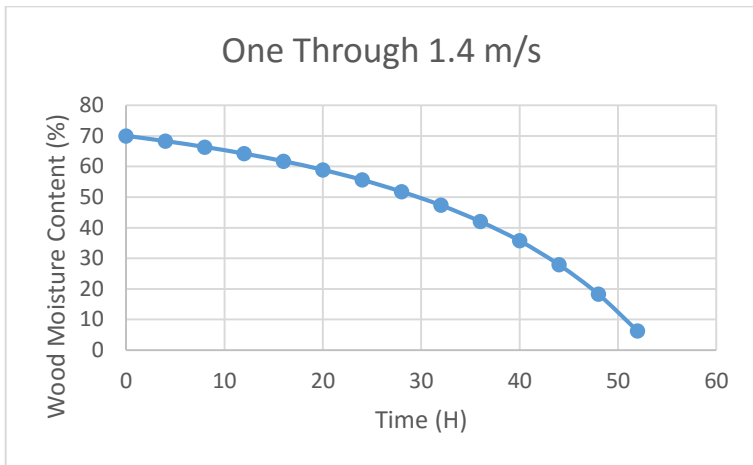
4.3.1.2 Grafik *Moisture Content* Kayu terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet 2.507 m/s* dengan Proses Pengeringan *Circulated*



Gambar 4.7 Perubahan *moisture content* kayu terhadap waktu pada *velocity inlet 2.507 m/s* dengan proses pengeringan *circulated*

Grafik di atas mempresentasikan proses pengeringan hasil simulasi pengeringan pada *velocity inlet 2.507 m/s* dengan proses pengeringan *circulated*. Jika dilihat sekilas, pada proses pengeringan secara *circulated* ini relatif sama dengan proses pengeringan secara *one through*. Hanya saja pada proses ini dalam waktu 33 jam dapat mengeringkan kayu dari *moisture content* 70 % menjadi 8.23 %. Dibandingkan dengan proses pengeringan secara *one through*, proses pengeringan secara *circulated* ini menghasilkan kayu yang lebih kering. Hal ini akan dibahas lebih lanjut pada pembahasan *psychrometric chart*.

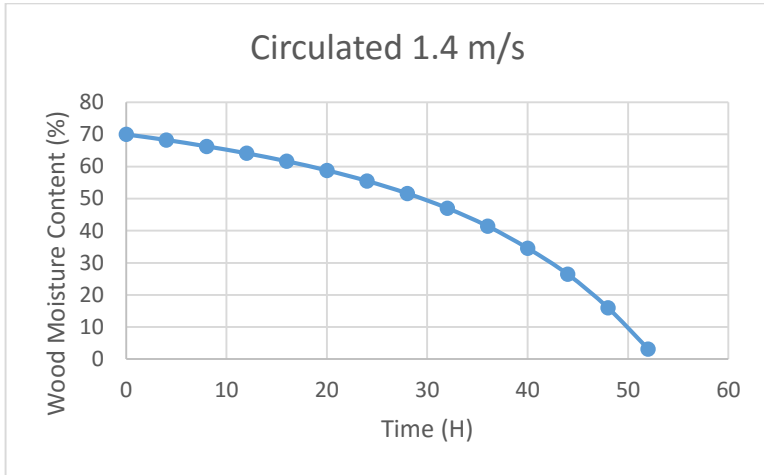
4.3.1.3 Grafik *Moisture Content* Kayu terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet* 1.4 m/s dengan Proses Pengeringan *One Through*



Gambar 4.8 Perubahan *moisture content* kayu terhadap waktu pada *velocity inlet* 1.4 m/s dengan proses pengeringan *one through*

Grafik di atas mempresentasikan proses pengeringan hasil simulasi pengeringan pada *velocity inlet* 1.4 m/s dengan proses pengeringan *one through*. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa *velocity inlet* 1.4 m/s menghasilkan waktu pengeringan yang lebih lama. Pada proses pengeringan *one through* dengan *velocity inlet* 1.4 m/s ini membutuhkan waktu 52 jam untuk mengeringkan kayu dengan *moisture content* 70 % menjadi 6.23 %. Jika dibandingkan dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s dengan proses pengeringan yang sama yaitu *one through*, variasi *velocity inlet* 1.4 m/s mempunyai selisih 19 jam lebih lama. Hal ini terjadi karena semakin kecil kecepatan udara, maka semakin dikit juga H_2O kayu yang terbawa oleh udara.

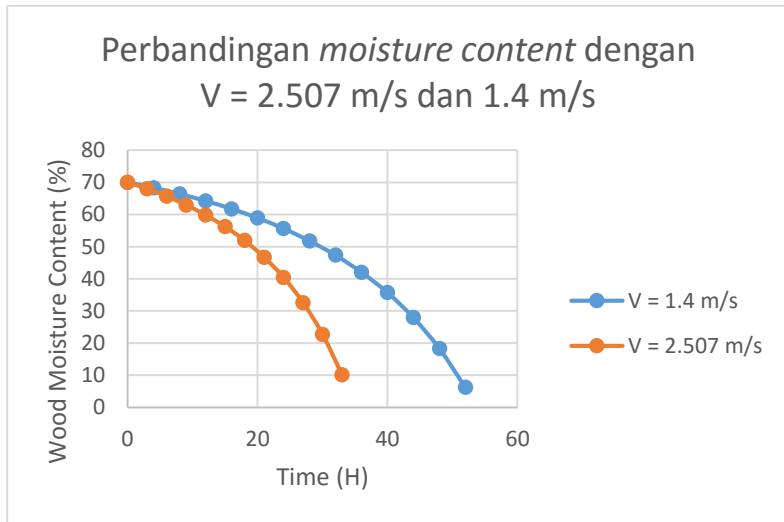
4.3.1.4 Grafik *Moisture Content* Kayu terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet* 1.4 m/s dengan Proses Pengeringan *Circulated*



Gambar 4.9 Perubahan *moisture content* kayu terhadap waktu pada *velocity inlet* 1.4 m/s dengan proses pengeringan *circulated*

Grafik di atas mempresentasikan proses pengeringan hasil simulasi pengeringan pada *velocity inlet* 1.4 m/s dengan proses pengeringan *circulated*. Jika dilihat sekilas, pada proses pengeringan secara *circulated* ini relatif sama dengan proses pengeringan secara *one through* pada *velocity inlet* yang sama 1.4 m/s. Hanya saja pada proses ini dalam waktu 52 jam mampu mengeringkan kayu dengan *moisture content* 70 % menjadi 3.17 %. Dibandingkan dengan proses pengeringan secara *one through*, proses pengeringan secara *circulated* dengan *velocity inlet* 1.4 m/s ini *moisture content* kayu-nya lebih kecil yang menandakan bahwa kayu ini lebih kering. Hal ini akan dibahas lebih lanjut pada pembahasan *psychrometric chart*.

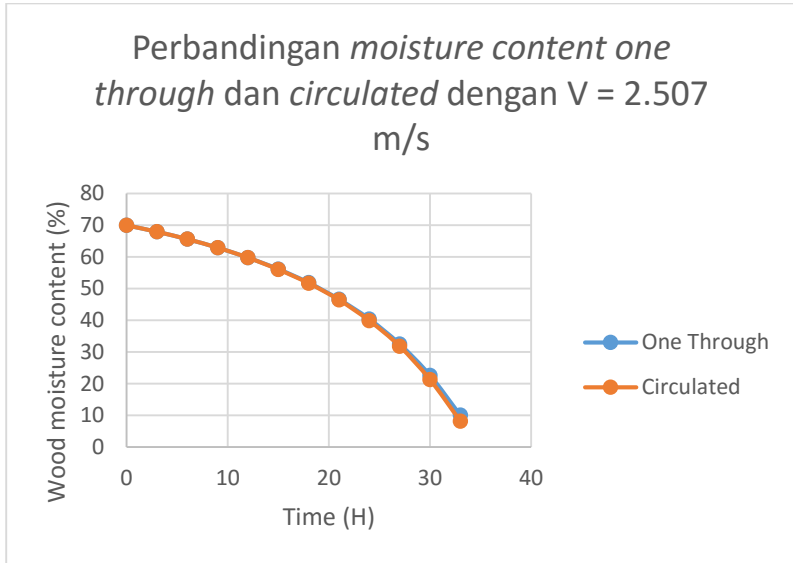
4.3.1.5 Grafik Perbandingan *Moisture Content* Kayu terhadap Time Step pada *Velocity Inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s



Gambar 4.10 Perbandingan *moisture content* kayu terhadap waktu pada *velocity inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s

Pada grafik perbandingan di atas hanya membandingkan variasi *velocity inlet* saja. Hal ini disebabkan karena variasi proses pengeringan *one through* dan *circulate* mempunyai grafik *moisture content* yang relatif sama. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa *velocity inlet* 2.507 m/s lebih cepat kering dibandingkan 1.4 m/s. Untuk itu dapat disimpulkan bahwa semakin cepat kecepatan udara pada proses pengeringan kayu, maka semakin cepat juga kayu tersebut akan kering.

4.3.1.6 Grafik Perbandingan *Moisture Content* Kayu terhadap Time Step pada proses pengeringan *one through* dan *circulated* dengan *Velocity Inlet* 2.507 m/s

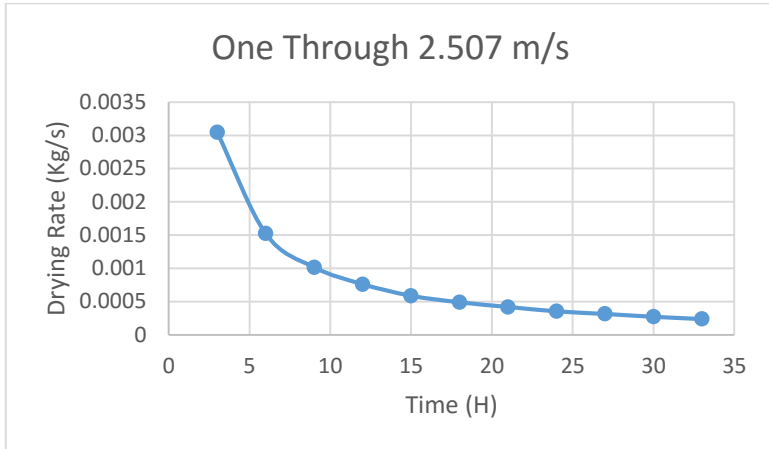


Gambar 4.11 Perbandingan *moisture content* kayu terhadap waktu pada proses pengeringan *one through* dan *circulated*

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa grafik *one through* dan *circulated* relatif sama. Pada waktu 33 jam mampu mengeringkan kayu dengan *moisture content* di bawah 15% dengan *one through* sebesar 10.09% dan *circulated* lebih kecil yaitu 8.23%.

4.3.2 Analisa Perubahan *Drying Rate* terhadap *Time Step*

4.3.2.1 Grafik *Drying Rate* terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet* 2.507 m/s dengan Proses Pengeringan *One Through*



Gambar 4.12 Perubahan *drying rate* terhadap waktu pada *velocity inlet* 2.507 m/s dengan proses pengeringan *one through*

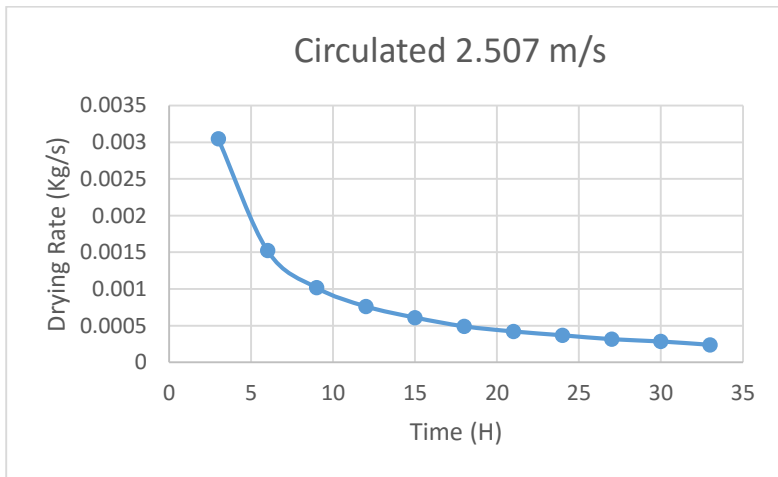
Berdasarkan grafik di atas didapatkan trend grafik *drying rate* terhadap waktu pengeringan pada variasi *velocity inlet* 2.507 m/s dengan proses pengeringan *one through*. Trend grafik memperlihatkan terjadi penurunan yang sangat signifikan pada *drying rate*. Pada grafik *drying rate* di atas dapat dilihat pada awal proses *drying rate* menurun sangat tajam, kemudian laju pengeringan menurun ditandai dengan trend grafik yang turun secara eksponensial hingga pada akhirnya *drying rate* tidak berkurang lagi terhadap waktu yang ditandai dengan *trendline* yang ber-asimtude dengan nilai *drying rate* 0.000237 kg/s.

Terjadinya perpindahan massa dalam proses pengeringan ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi massa H_2O pada udara dengan konsentrasi H_2O yang terkandung pada kayu. Perbedaan konsentrasi massa H_2O pada udara dengan konsentrasi

H_2O yang terkandung pada kayu berbanding lurus dengan perpindahan massa. Secara teoritis keterkaitan antara perbedaan konsentrasi massa terhadap laju perpindahan massa dapat dijelaskan berdasarkan persamaan berikut

$$N_A = h_m \cdot A \cdot (C_{H_2O, kayu} - C_{H_2O, inlet}) \dots \dots \dots (4.2)$$

4.3.2.2 Grafik *Drying Rate* terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet 2.507 m/s* dengan Proses Pengeringan *Circulated*

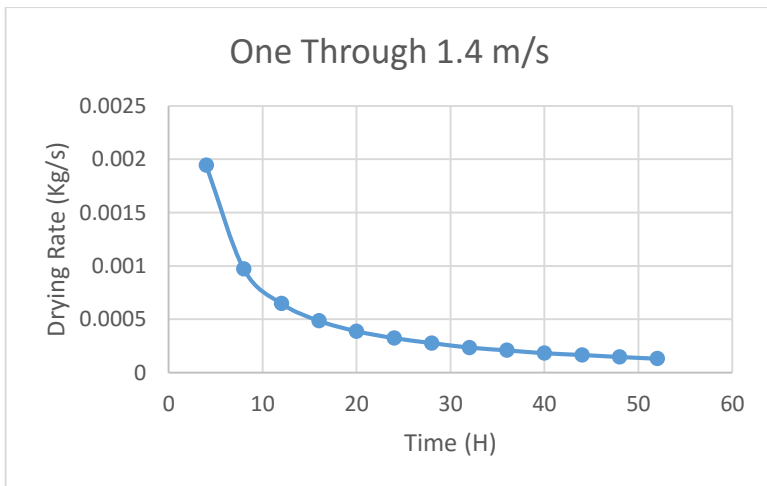


Gambar 4.13 Perubahan *drying rate* terhadap waktu pada *velocity inlet 2.507 m/s* dengan proses pengeringan *circulated*

Grafik di atas mempresentasikan hasil simulasi proses pengeringan *circulated* dengan *velocity inlet 2.507 m/s* mempunyai *drying rate* menurun dari 0.003046 kg/s hingga 0.000237 kg/s dengan waktu 33 jam. Pada awal proses *drying rate* terlihat turun dengan curam, kemudian laju pengeringan mulai menurun hal ini ditandai dengan trend grafik yang turun secara eksponensial hingga akhirnya *drying rate* tidak berkurang lagi terhadap waktu.

Terjadinya perpindahan massa dalam proses pengeringan ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi massa H_2O pada udara dengan konsentrasi H_2O yang terkandung pada kayu. Perbedaan konsentrasi massa H_2O pada udara dengan konsentrasi H_2O yang terkandung pada kayu berbanding lurus dengan perpindahan massa. Seperti pada grafik *moisture content*, variasi proses pengeringan *circulated* menghasilkan kayu lebih kering dibandingkan dengan variasi proses pengeringan *one through*.

4.3.2.3 Grafik *Drying Rate* terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet 1.4 m/s* dengan Proses Pengeringan *One Through*



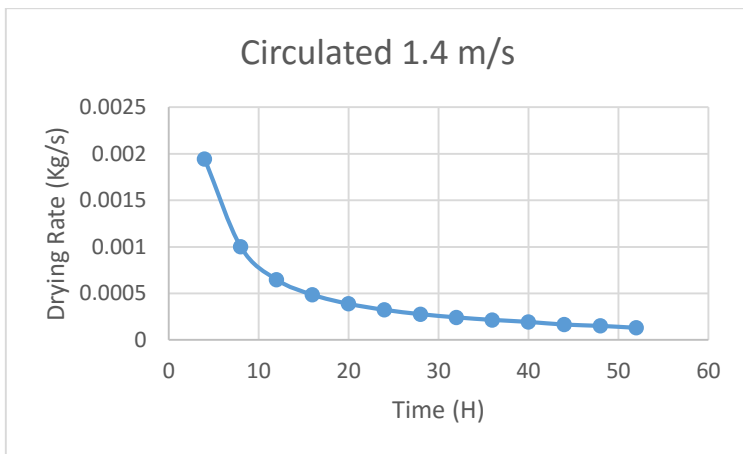
Gambar 4.14 Perubahan *drying rate* terhadap waktu pada *velocity inlet 1.4 m/s* dengan proses pengeringan *one through*

Grafik di atas menunjukkan hasil simulasi proses pengeringan *one through* dengan *velocity inlet 1.4 m/s*. *Drying rate* menurun dari 0.001944 kg/s sampai 0.000131 kg/s dalam waktu 52 jam. Terlihat pada awal proses *drying rate* menurun tajam, lalu laju pengeringan terlihat menurun ditandai dengan trend grafik

turun secara eksponensial hingga pada akhirnya *moisture content* kayu tidak berkurang lagi terhadap waktu.

Seperti pada variasi sebelumnya, terjadinya perpindahan massa dalam proses pengeringan ini dikarenakan adanya perbedaan konsentrasi massa H_2O pada udara dengan konsentrasi H_2O yang terkandung pada kayu. Perbedaan konsentrasi massa H_2O pada udara dengan konsentrasi H_2O yang terkandung pada kayu berbanding lurus dengan perpindahan massa. Jika dibandingkan dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s, variasi dengan *velocity inlet* 1.4 m/s ini terlihat lebih landai pada saat laju pengeringan menurun dengan perbedaan waktu pengeringan 19 jam lebih lama.

4.3.2.4 Grafik *Drying Rate* terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet* 1.4 m/s dengan Proses Pengeringan *Circulated*



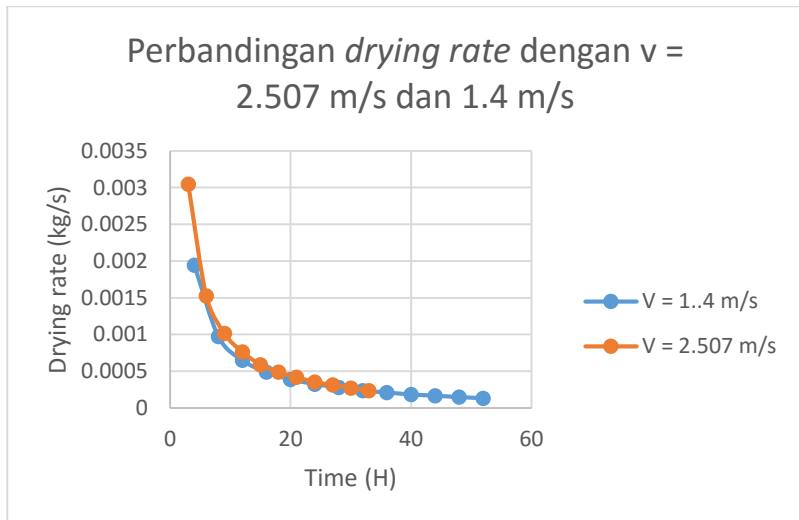
Gambar 4.15 Perubahan *drying rate* terhadap waktu pada *velocity inlet* 1.4 m/s dengan proses pengeringan *circulated*

Grafik diatas tidak jauh berbeda dengan proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* yang sama. *Drying rate* terlihat menurun dari 0.001944 kg/s hingga 0.00031 kg/s

dalam waktu 52 jam. Terlihat pada awal proses *drying rate* menurun tajam, lalu laju pengeringan terlihat menurun ditandai dengan trend grafik turun secepat eksponensial hingga pada akhirnya *moisture content* kayu tidak berkurang lagi terhadap waktu seperti pada proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* yang sama.

Jika dibandingkan dengan proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* yang sama yaitu 1.4 m/s, proses pengeringan *circulated* menghasilkan kayu lebih kering seperti pada grafik *moisture content*. Perbedaan *moisture content* tersebut dikarenakan fakto-faktor tertentu yang akan dibahas pada *psychrometric chart*.

4.3.2.5 Grafik Perbandingan *Drying Rate* Kayu terhadap *Time Step* pada *Velocity Inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s

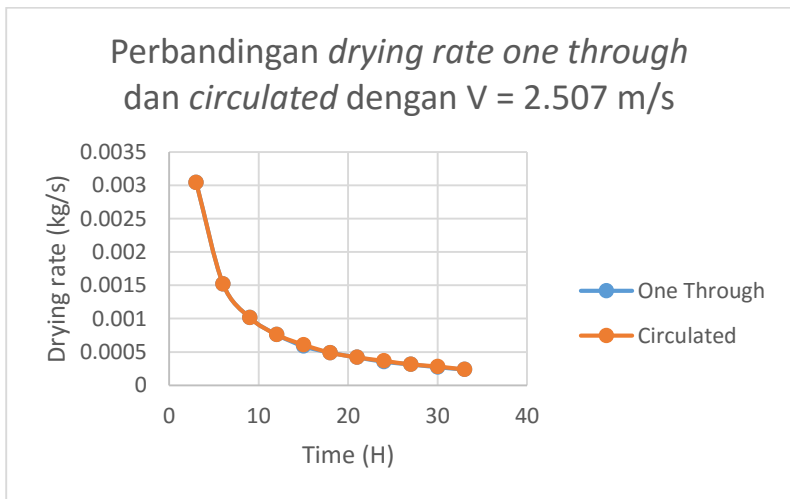


Gambar 4.16 Perbandingan *moisture content* kayu terhadap waktu pada *velocity inlet* 2.507 m/s dan 1.4 m/s

Sama seperti grafik perbandingan *moisture content*, grafik perbandingan *drying rate* hanya membandingkan variasi *velocity*

inlet saja. Hal ini disebabkan karena variasi proses pengeringan *one through* dan *circulated* mempunyai grafik *drying rate* yang relatif sama. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa *velocity inlet* 2.507 m/s lebih cepat kering dibandingkan 1.4 m/s. Hal ini disebabkan karena *drying rate* yang besar pada awal proses yang menyebabkan *velocity inlet* 2.507 m/s lebih cepat kering dibandingkan 1.4 m/s yang dapat dilihat pada grafik. Pada *velocity inlet* 1.4 m/s terlihat lebih landai dibandingkan 2.507 m/s dikarenakan awal proses *drying rate*-nya tidak begitu besar, sehingga membutuhkan lebih banyak waktu untuk mengeringkan.

4.3.2.6 Grafik Perbandingan *Moisture Content* Kayu terhadap Time Step pada proses pengeringan *one through* dan *circulated* dengan *Velocity Inlet* 2.507 m/s



Gambar 4.17 Perbandingan *drying rate* kayu terhadap waktu pada proses pengeringan *one through* dan *circulated*

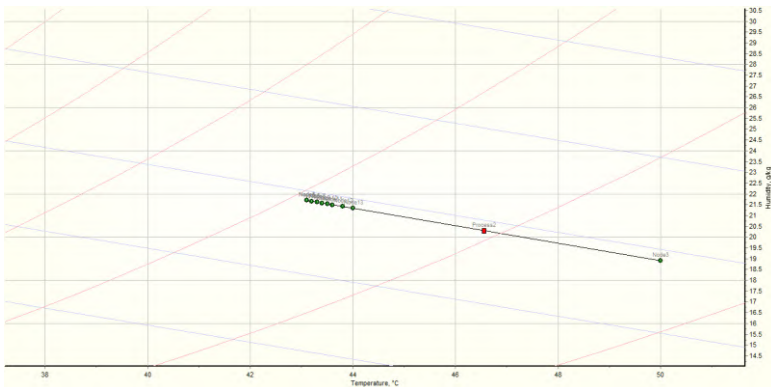
Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa grafik *one through* dan *circulated* relatif sama. Perbandingan dilakukan pada kecepatan yang sama yaitu pada kecepatan 2.507 m/s. Dapat dilihat

drying rate variasi proses pengeringan secara *one through* dengan variasi proses pengeringan secara *circulated* cenderung sama dengan nilai awal *drying rate* besar lalu semakin mengecil seiring dengan bertambahnya waktu.

4.4 Analisa Psychrometric Karakteristik Pengeringan

Dalam simulasi pengeringan kayu ini juga akan dianalisa melalui *psychrometric chart* agar meningkatkan kualitas interpretasi hasil penelitian, serta mengetahui fenomena pengeringan selama di dalam *drying chamber*. Analisa *psychrometric chart* pada proses pengeringan kayu ini dibutuhkan agar dapat mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi proses pengeringan kayu. Faktor yang membuat proses pengeringan kayu menjadi lebih cepat menjadi penting untuk dianalisa dalam penelitian ini. Sehingga diharapkan adanya penelitian ini akan mendapat rekomendasi dalam pengembangan teknologi pengeringan kayu agar dapat membantu UKM untuk memajukan dan meningkatkan usahanya.

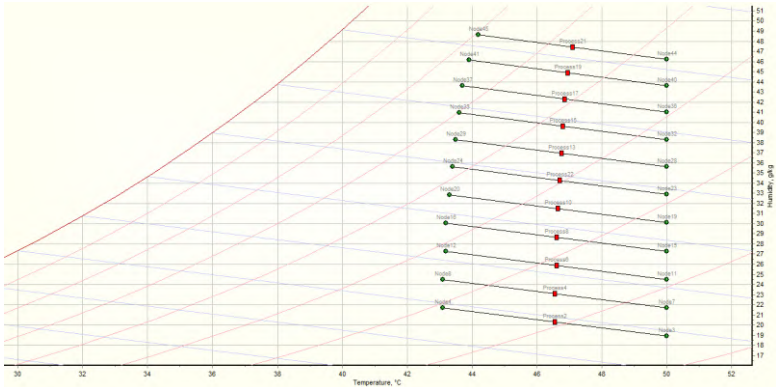
4.4.1 Analisa Psychrometric Chart dengan Velocity Inlet 2.507 m/s pada Proses Pengeringan One Through



Gambar 4.18 Psychrometric Chart velocity inlet 2.507 m/s pada proses pengeringan *one through*

Gambar *psychrometric chart* di atas merupakan proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s. Garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan dimana udara kering masuk melalui *drying chamber*. Titik di sebelah kanan merupakan posisi *inlet*, seperti sudah diketahui bahwa *inlet* dalam proses pengeringan *one through* tidak berubah. Lalu garis yang melintang tersebut merupakan proses *isenthalpy* pada *psychrometric chart*. Titik-titik di sebelah kiri merupakan posisi *outlet* setelah simulasi. Dapat dilihat bahwa posisi *outlet* semakin menurun dan temperature *outlet* semakin naik yang membuat selisih dari *humidity ratio* semakin kecil. Posisi *inlet* mempunyai temperature tinggi tetapi *RH* dan *humidity ratio*-nya rendah, namun pada posisi *outlet* mempunyai temperature yang lebih rendah tetapi *RH* dan *humidity ratio*-nya tinggi karena proses pengeringan dimana terjadi pendinginan dan H_2O kayu terbawa oleh udara sehingga massa H_2O udara menjadi bertambah. Jika selisih *humidity ratio* semakin kecil maka semakin sedikit H_2O pada kayu yang ter-evaporasi. Hal ini yang membuat *drying rate* semakin landai menjelang akhir proses.

4.4.2 Analisa *Psychrometric Chart* dengan *Velocity Inlet* 2.507 m/s pada Proses Pengeringan *Circulated*

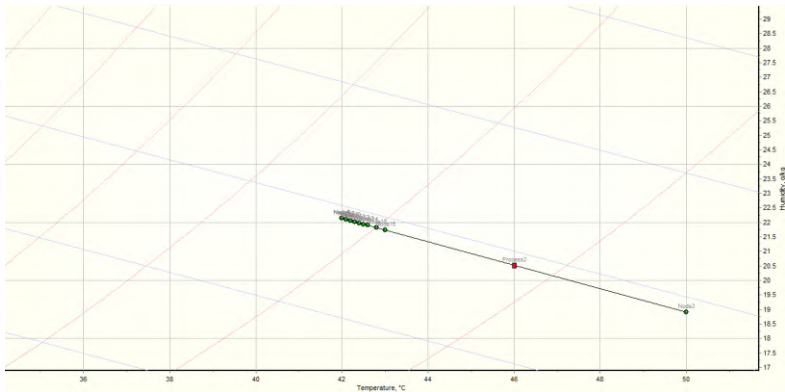


Gambar 4.19 *Psychrometric Chart* velocity inlet 2.507 m/s pada proses pengeringan *Circulated*

Gambar *psychrometric chart* di atas merupakan proses pengeringan *circulated* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s. Garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan dimana udara kering masuk melalui *drying chamber*. Titik di sebelah kanan merupakan posisi *inlet* dan titik disebelah kiri merupakan *outlet*. Lalu garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan *isenthalpy* pada *psychrometric chart*. Posisi *inlet* terlihat semakin naik menandakan bahwa *relative humidity* pada *inlet* semakin naik dikarenakan *inlet* pada proses pengeringan *circulated* menggunakan *humidity ratio* pada *outlet* proses sebelumnya. Dapat dilihat bahwa temperatur posisi *outlet* semakin naik yang membuat selisih dari *humidity ratio* semakin kecil. Jika selisih *humidity ratio* semakin besar maka semakin banyak H_2O pada kayu yang ter-evaporasi. Pada simulasi ke-5 terlihat selisih *humidity ratio* pada proses pengeringan *circulated* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s lebih besar ($0.0028 \frac{kg H_2O}{kg \text{ udara}}$) dibandingkan selisih *humidity ratio* pada proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s ($0.0027 \frac{kg H_2O}{kg \text{ udara}}$). Hal ini yang

membuat proses pengeringan *circulated* dengan *velocity inlet* 2.507 m/s lebih kering dalam waktu 33 jam dibandingkan proses pengeringan *one through* dengan *velocity inlet* yang sama.

4.4.3 Analisa Psychrometric Chart dengan *Velocity Inlet* 1.4 m/s pada Proses Pengeringan *One Through*

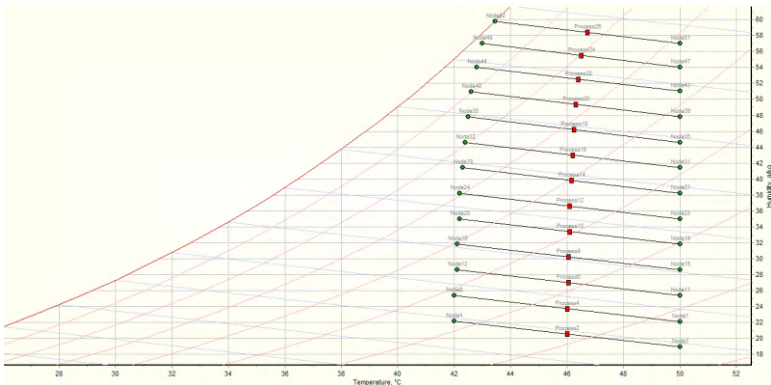


Gambar 4.20 *Psychrometric Chart velocity inlet 1.4 m/s pada proses pengeringan one through*

Gambar *psychrometric chart* di atas merupakan proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s. Dapat dilihat pada gambar bahwa terlihat hasil proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s ini relatif sama dengan proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s. Namun pada proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s, temperature outlet lebih rendah dibandingkan proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s. Hal ini membuat selisih *humidity ratio* pada proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s lebih besar dibandingkan dengan selisih *humidity ratio* pada proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 2.507 m/s. Tetapi dikarenakan *velocity inlet*-nya lebih rendah, maka proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet*

1.4 m/s membutuhkan lebih banyak waktu untuk mengeringkan kayu (19 jam lebih lama).

4.4.4 Analisa *Psychrometric Chart* dengan *Velocity Inlet* 1.4 m/s pada Proses Pengeringan *Circulated*



Gambar 4.21 *Psychrometric Chart* velocity inlet 1.4 m/s pada proses pengeringan *Circulated*

Gambar *psychrometric chart* di atas merupakan proses pengeringan *circulated* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s. Garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan dimana udara kering masuk melalui *drying chamber*. Titik di sebelah kanan merupakan posisi *inlet* dan titik disebelah kiri merupakan *outlet*. Lalu garis yang melintang tersebut merupakan proses pengeringan *isenthalpy* pada *psychrometric chart*. Posisi *inlet* terlihat semakin naik yang menandakan *relative humidity* juga semakin naik, hal ini dikarenakan *inlet* pada proses pengeringan *circulated* menggunakan *humidity ratio* pada *outlet* proses sebelumnya. Dapat dilihat bahwa temperatur posisi *outlet* semakin naik yang membuat selisih dari *humidity ratio* semakin kecil. Jika selisih *humidity ratio* semakin besar maka semakin banyak H_2O pada kayu yang ter-evaporasi. Pada simulasi ke-8 terlihat selisih *humidity ratio* pada proses pengeringan *circulated* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s lebih besar ($0.0032 \frac{kg H_2O}{kg udara}$) dibandingkan selisih *humidity ratio*

pada proses pengeringan *one through* dengan variasi *velocity inlet* 1.4 m/s ($0.0031 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg udara}}$). Hal ini yang membuat proses pengeringan *circulated* dengan *velocity inlet* 1.4 m/s menghasilkan kayu lebih kering dibandingkan proses pengeringan *one through* dengan *velocity inlet* yang sama.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Pembahasan serta analisa data pada bab sebelumnya, maka dalam penelitian mengenai simulasi proses pengeringan kayu dengan variasi kecepatan dan proses pengeringan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pada simulasi pengeringan kayu variasi proses pengeringan kayu, *one through* dan *circulated* tidak terlalu mempengaruhi karakteristik pengeringan.
2. Variasi *velocity inlet* mempengaruhi karakteristik pengeringan kayu, semakin tinggi *velocity inlet* udara pengering maka laju perpindahan massa *moisture content* kayu ke udara semakin cepat. Dari hasil simulasi dan perhitungan laju pengeringan tercepat diperoleh dari proses pengeringan *circulated* pada *velocity inlet* 2.507 m/s yaitu 33 jam dengan *moisture content* 8.23%, lalu proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* 2.507 m/s yaitu 33 jam dengan *moisture content* 10.09%, kemudian proses pengeringan *circulated* pada *velocity inlet* 1.4 m/s yaitu 52 jam dengan *moisture content* 3.17% dan terakhir proses pengeringan *one through* pada *velocity inlet* 1.4 m/s yaitu 52 jam dengan *moisture content* 6.23%.
3. Selisih *humidity ratio* disetiap simulasi mempengaruhi banyaknya massa H_2O yang ter-uapkan. Semakin besar selisih *humidity ratio* maka semakin banyak massa H_2O yang ter-uapkan dan semakin kecil selisih *humidity ratio* maka semakin sedikit massa H_2O yang ter-uapkan.
4. Dari data-data hasil simulasi pada bab sebelumnya didapat bahwa variasi terbaik yang dapat digunakan sebagai pengeringan kayu adalah variasi proses pengeringan *circulated* dengan *velocity inlet* 2.507 m/s.

5.2 Saran

Dari hasil simulasi pengeringan kayu dengan variasi kecepatan dan proses pengeringan tentunya memiliki kekurangan. Saran yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas penelitian dimasa mendatang antara lain :

1. Perlu dilakukan simulasi secara 3D untuk mendekati kondisi sesungguhnya.
2. Penelitian disimulasikan dengan kondisi unsteady agar hasil yang didapat mendekati kondisi sesungguhnya.
3. Menggunakan *software* lain atau menambahkan *software* tambahan pada *fluent* agar dapat mengetahui proses pengeringan yang terjadi dari dalam kayu menuju ke permukaan kayu (proses perpindahan massa secara difusi pada kayu).
4. Melakukan simulasi dengan menghilangkan asumsi *isenthalpy* lalu membandingkannya dengan *psychrometric chart*.

DAFTAR PUSTAKA

Faizy, Muh. Muhakkikin. *Studi Numerik Karakteristik Laju Pengeringan Batubara Terhadap Pengaruh Variasi Temperatur Udara Pengering Pada Fluidized Bed Coal Dryer Dengan Tube heater Tersusun Staggered Dan Perbandingan Volume Batubara Dengan Volume Chamber Sebesar 80%.* 2013. **ITS Surabaya, Indonesia.**

Incropera, Frank P., De Witt, David P. *Fundamental of Heat and Mass Transfer.* 6th Edition. 2007. **John Wiley & Sons Inc. New York.**

Moran, Michael J., Shapiro, Howard N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics.* 5th Edition. 2006. **John Wiley & Sons Ltd. The Atrium.**

Mujumdar, Arun S., *Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition.* 2015. **CRC Press. New York.**

Zadin V., *Application Of Multiphysics And Multiscale Simulations To Optimize Industrial Wood Drying Kilns.* 2015. **Tartu University, Estonia.**

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Magelang pada 28 Mei 1991, merupakan anak kedua dari 3 (tiga) bersaudara.

Penulis memulai pendidikan dasar di SD Trinitas Jakarta Barat, melanjutkan studi menengah pertama di SMP Trinitas Jakarta Barat, kemudian melanjutkan studi ke jenjang menengah di SMA Negeri 112 Jakarta, menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2009. Pada Juli 2010, penulis melanjutkan studi ke perguruan tinggi di Universitas Gadjah Mada pada Fakultas Teknik, Program Studi Diploma Teknik Mesin dan lulus pada November 2013. Pada Januari 2014, penulis melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin. Penulis tertarik pada bidang studi Konversi Energi khususnya pada perpindahan panas, oleh karena itu penulis mendedikasikan Tugas Akhir pada bidang perpindahan panas agar bermanfaat bagi masyarakat khususnya bagi diri sendiri. Dan penulis akan selalu berusaha supaya ilmu yang telah diperoleh dapat bermanfaat.

Untuk mendapatkan informasi lebih lengkap dapat menghubungi penulis di cheri.sitanggang@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan